

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**EVALUACIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES
EN TIZIMÍN, YUCATÁN, MÉXICO**

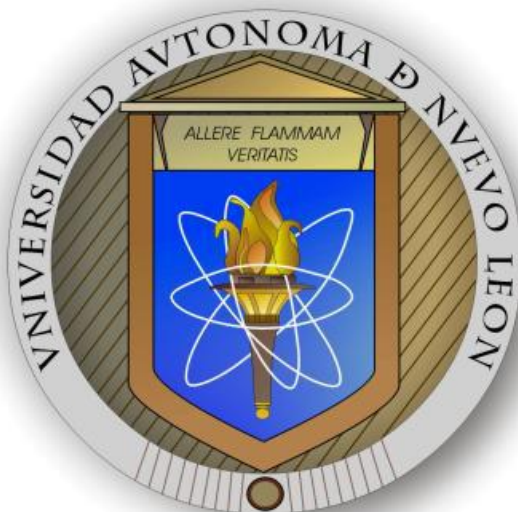
POR

DORA ALICIA GARCÍA GARCÍA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

AGOSTO, 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



TESIS

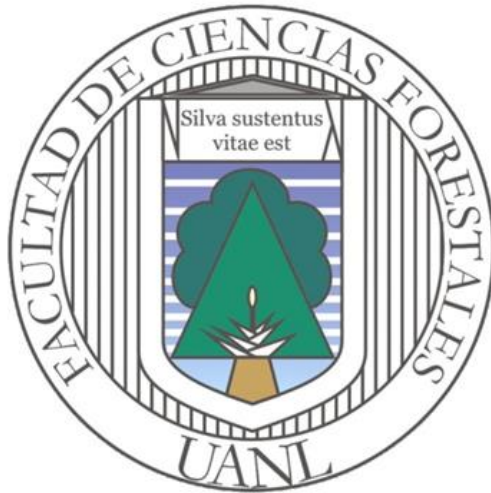
**EVALUACIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES
EN TIZIMÍN, YUCATÁN, MÉXICO**

**POR
DORA ALICIA GARCÍA GARCÍA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

AGOSTO, 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**EVALUACIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES
EN TIZIMÍN, YUCATÁN, MÉXICO**

POR

DORA ALICIA GARCÍA GARCÍA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**


AGOSTO, 2019

EVALUACIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES EN TIZIMÍN, YUCATÁN, MÉXICO.

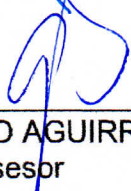
Aprobación de Tesis



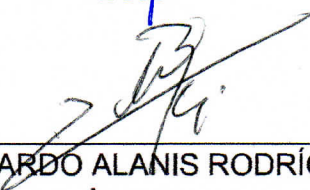
DR. JAVIER JIMÉNEZ PÉREZ
Director



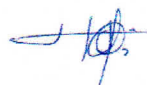
DR. ISRAEL YERENA YAMALLEL
Codirector



DR. OSCAR ALBERTO AGUIRRE CALDERÓN
Asesor



DR. EDUARDO ALANIS RODRÍGUEZ
Asesor



DR. HECTOR DE LEÓN GÓMEZ
ASESOR EXTERNO

AGOSTO 2019

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis más que un fin es un medio y una forma donde la voluntad, esfuerzo, creatividad y propósitos se amalgaman para alcanzar una meta, sin escatimar esfuerzos personales e institucionales.

Agradezco sinceramente a:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por darme la oportunidad y el apoyo económico para realizar mis estudios de Postgrado y los intercambios académicos.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por su aportación brindada para el establecimiento y desarrollo de este trabajo.

Al Comité de Tesis donde cada uno de los integrantes de manera honesta, capaz y respetuosa crearon un ambiente de confianza y responsabilidad en el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez, por su disposición, tiempo, dedicación, atinada dirección, valiosos consejos, amistad y confianza en que llegaría a esta investigación a buen término.

Al Dr. Israel Yerena Yamallel por su participación e intereses vertidos en sus comentarios, sugerencias y observaciones.

Al Dr. Oscar A. Aguirre, por su disposición al análisis y valiosos comentarios en torno a la investigación realizada y derroche de buena amistad.

Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez por su interés y apoyo en este trabajo.

Al Dr. Arturo Mora Olivo por su participación en este trabajo.

Al personal académico y administrativo de la Facultad de Ciencias Forestales por su valioso apoyo durante mi estancia en el programa de doctorado.

A todos los profesores de la Facultad, por haberme transmitido sus conocimientos, por su paciencia y su buen trato durante mi formación.

A mis compañeros de generación: Ricardo, Perla, Ulises, Rigoberto y Marco, por los grandes momentos que pasamos juntos, pero sobre todo por su amistad.

A mis compañeros de Laboratorio de Carbono: Eduardo, Claudio, Joe, Andrés, Ana y Valeria.

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado todo lo que tengo en esta vida, por todas sus bendiciones, darme la oportunidad de ser una herramienta de ayuda en este mundo y por darme la fuerza para levantarme cuando tropiezo.

A mi esposo Genaro Esteban García Mosqueda por su apoyo en todo momento, por su amor, cariño y comprensión. A mis hijos, que son mi razón de ser: Nicolás y Grecia.

A mis padres José Héctor García Cortes y Nicolasa García Calvo (†), por el apoyo y amor incondicional, por siempre tener confianza en mi persona, por todos los consejos para seguir adelante.

A mis hermanas Sandra, Sanjuana, Silvia, Ma. Antonia, Marisol, Isabel y a mi hermano José Héctor García.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	2
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. HIPÓTESIS	13
5. OBJETIVOS	13
5.1. GENERAL.....	13
5.2. PARTICULAR	13
6. METODOLOGÍA.....	13
6.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE	13
6.1.1. Clasificación taxonómica	13
6.1.2. Clima.....	14
6.1.3. Suelos y topografía	14
6.1.4. Usos.....	14
6.2. ÁREA DE ESTUDIO	15
6.3. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	15
6.3.1. Estimación del volumen fustal de la plantación de teca.....	15
6.3.2. Muestreo para determinación de biomasa y densidad de la madera....	17
6.3.2.1. Recolección de muestras	17
6.3.2.2. Variables para la estimación de biomasa	17
6.3.2.2.1. Submuestras del fuste.....	18
6.3.2.2.2. Ramas	18
6.3.2.2.3. Hojas	18
6.3.2.3. Densidad de la madera.....	19
6.3.3. Fase de laboratorio	19
6.3.3.1. Secado de submuestras para la determinación de biomasa	19
6.3.3.2. Secado de submuestras para determinación de densidad de madera	20
6.3.3.3. Determinación de carbono.....	21
6.3.4. Análisis de la información	21

6.3.4.1. Ecuaciones para el cálculo de variables.....	22
6.3.4.1.1. Densidad básica.....	22
6.3.4.1.2. Biomasa del fuste.....	22
6.3.4.1.3. Biomasa total del follaje	23
6.3.4.1.4. Biomasa total de ramas.....	23
6.3.4.1.5. Biomasa total de ramillas	23
6.3.4.1.6. Biomasa total árbol.....	24
6.3.4.1.7. Factor de expansión de biomasa	24
6.3.4.1.7. Relación biomasa radical-biomasa total.....	25
6.3.4.1.8. Factor de conversión de carbono	25
6.3.4.1.9. Cuantificación de carbono y dióxido de carbono almacenado en los árboles.....	25
6.3.4.1.10. Productividad.....	26
7. RESULTADOS	28
7.1. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN EXISTENTE EN LA PLANTACIÓN	28
7.2. DENSIDAD DE LA MADERA DE <i>Tectona grandis</i>	30
7.3. BIOMASA DE CADA COMPONENTE ARBÓREO	31
7.4. FACTOR DE EXPANSIÓN DE BIOMASA (FEB).....	32
7.5. FACTOR DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A CARBONO.....	33
7.6. FIJACIÓN DE CARBONO Y DIÓXIDO DE CARBONO	34
7.7. TABLA DE PRODUCTIVIDAD PRELIMINAR	39
8. DISCUSIÓN	46
9. CONCLUSIONES.....	47
10. REFERENCIAS.....	47
11. ANEXOS	52

No.	Índice de Cuadros	Página
1	Estadísticos de las variables dasométricas de <i>Tectona grandis</i> .	30
2	Densidad de la madera de <i>Tectona grandis</i> .	31
3	Biomasa promedio por componentes de árboles de <i>T. grandis</i> .	31
4	Cálculo del factor de expansión de biomasa <i>Tectona grandis</i> .	32
5	Resultados del análisis de carbono por componentes de árboles de <i>Tectona grandis</i> .	33
6	Valores estadísticos de los parámetros del modelo evaluado en la cuantificación del carbono acumulado en <i>Tectona grandis</i> .	34
7	Valores estadísticos de los parámetros del modelo evaluado en la cuantificación del dióxido de carbono acumulado en <i>Tectona grandis</i> .	36
8	Biomasa acumulada en la plantación de teca.	37
9	Carbono acumulado en la plantación de teca.	37
10	Dióxido de carbono acumulado en la plantación de teca.	37
11	Estimados de los parámetros de los modelos de crecimiento y sus estadísticos de significancia. Año de establecimiento 2011.	40
12	Productividad preliminar de Teca para índice de sitio 8 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.	41
13	Producción preliminar de Teca para índice de sitio 11 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.	42
14	Productividad preliminar de Teca para índice de sitio 13 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.	43
15	Productividad preliminar de Teca para índice de sitio 15 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.	45

No.	Índice de Figuras	Página.
1	Proporción relativa de carbono (C), Agua (H ₂ O), y otros elementos (N, P, K, Ca, Mg, etc.) contenida en la biomasa (a) húmeda y (b) seca de los árboles.	3
2	Proceso químico de fotosíntesis.	3
3	Ubicación de plantación forestal comercial de <i>T. grandis</i> .	15
4	Ubicación de las medidas siguientes al derribo de árboles.	15
5	Medidas de diámetro y longitud a lo largo del fuste del árbol.	18
6	Relación lineal del diámetro normal y la altura total en las 4 edades (A 2011, B 2012, C 2013, D 2016) de <i>T. grandis</i> .	29
7	Dispersión de datos entre volumen fustal y diámetro normal de <i>T. grandis</i> (A 2011, B 2012, C 2013, D 2016).	30
8	Porcentaje de biomasa contenida en la estructura aérea de <i>T. grandis</i> (A 2011, B 2012, C 2013, D 2016) muestreados para las diferentes edades en el Rancho San Miguel, Tizimin Yucatán.	32
9	Sistema de curvas de índice de sitio para plantaciones de teca establecida en 2011 (Edad base 16 años).	39

RESUMEN

El efecto invernadero se origina por la acumulación de gases en la atmósfera debido a que las partículas permiten el paso de los rayos solares; una vez que entran a la tierra, parte de esta energía se refleja en diferentes proporciones, dependiendo del lugar que la refleje, por ejemplo los océanos y los desiertos reflejan mayor cantidad de luz que las áreas provistas de vegetación. El carbono se acumula en los ecosistemas forestales mediante la absorción de CO_2 atmosférico y su asimilación en la biomasa. El objetivo general del presente trabajo es evaluar y cuantificar el carbono y bióxido de carbono en una plantación de Teca (*Tectona grandis*). Esta investigación se realizó en el Rancho San Miguel, municipio de Tizimín, en el estado de Yucatán, donde se cuenta con una plantación de 800 hectáreas, dicha plantación fue establecida en diferentes años (2011, 2012, 2013, 2016) realizando la última medición en el año 2017. Por lo que se cuenta con árboles de 1 año, de 4, de 5 y de 6 años de edad.

La metodología utilizada para llevar a cabo esta investigación fue con muestreos de sitios permanentes de los últimos 5 años, obtenidos a partir de inventario forestal. Se establecieron 3 fases para dicho trabajo: campo, laboratorio y gabinete. La toma de datos de campo se realizó en el año 2017, la muestra consistió en 3,059 árboles; efectuándose mediciones de variables dasométricas en cada árbol; los datos colectados fueron diámetros a 0.3 m sobre el nivel del suelo ($d_{0.3}$), diámetro a la altura del pecho ($d_{1.3}$) y diámetros a cada dos metros (d_2 , d_4 , d_6 , d_8 , d_{10} , d_{12} , d_{14}) hasta la altura total (h) con el Dendrómetro Criterion RD 1000®.

El muestreo se realizó de acuerdo a los puntos cardinales (N, S, E, W). Se separaron de las ramillas para colocarlas en bolsas de papel con capacidad de 3 kg, se identificaron con un código y se procedió a realizar en peso de cada submuestras, se obtuvieron 3 submuestras de cada árbol las cuales fueron trasladadas a los Laboratorios de Carbono, Laboratorio de Tecnología de la Madera y Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde dichas muestras se secaron a una temperatura de 75 °C en un horno digital de secado marca Riossa modelo HCF-102-D durante 72 horas.

Para la concentración de carbono total se realizó con un equipo analítico denominado Solids TOC Analyzer modelo 1020A de O-I-Analytical; éste determina las concentraciones en muestras sólidas mediante combustión completa, a una temperatura de 900 °C, los gases producto de la combustión son medidos a través de un detector de infrarrojo no dispersivo que contabiliza las moléculas de carbono contenidas en estos gases; se pulverizaron las submuestras madera, hojas y ramillas en un molino marca Marathon Electric serie C20J020016.

De acuerdo los resultados del contenido de biomasa en los árboles para las distintas edades de la plantación se observó que en el fuste es donde se acumula el 50% del total de biomasa del árbol. Que el factor de conversión de biomasa a carbono está muy cercano al valor de 0.50; el contenido de biomasa acumulada en la plantación es de 45,399 toneladas, el contenido de carbono es de 24,042.77 toneladas y el bióxido de carbono es de 88,241.15 toneladas.

ABSTRACT

The greenhouse effect is caused by the accumulation of gases in the atmosphere because the particles allow the passage of solar rays; once they enter the earth, part of this energy is reflected in different proportions, depending on the place that reflects it, for example the oceans and the deserts reflect greater amount of light than the areas provided with vegetation. Carbon accumulates in forest ecosystems by absorbing atmospheric CO₂ and assimilating it into biomass. The general objective of this work is to evaluate and quantify carbon and carbon dioxide in a plantation of Teak (*Tectona grandis*). This investigation was carried out in Rancho San Miguel, municipality of Tizimín, in the state of Yucatán, where there is a plantation of 800 hectares, this plantation was established in different years (2011, 2012, 2013, 2016), making the last measurement in the year 2017. So it has trees of 1 year, 4, 5 and 6 years old.

The methodology used to carry out this research was with sampling of permanent sites of the last 5 years, obtained from forest inventory. Three phases were established for this work: field, laboratory and cabinet. The field data collection was done in the year 2017, the sample consisted of 3,059 trees; taking measurements of dasometric variables in each tree; the data collected were diameters at 0.3 m above ground level (d0.3), diameter at breast height (d1.3) and diameters at every two meters (d2, d4, d6, d8, d10, d12, d14) up to the total height (h) with the Criterion RD 1000® Dendrometer.

The sampling was carried out according to the cardinal points (N, S, E, W). The twigs were separated to place them in paper bags with a capacity of 3 kg, identify them with a code and they will be processed in the weight of each of them, 3 subsamples of each tree will be obtained the answers of the Carbon Laboratories, Technology Laboratory of the Wood and Laboratory of Chemistry of the Faculty of Forestry Sciences of the Autonomous University of Nuevo Leon, where the samples are at a temperature of 75 ° C in a digital drying oven brand Riossa model HCF-102-D for 72 hours .

For the total carbon concentration was performed with an analytical equipment called Solids TOC Analyzer model 1020A of OI Analytical; it determines the concentrations in solid samples by complete combustion, at a temperature of 900 ° C, the gases produced by combustion are measured through a non-dispersive infrared detector that counts the carbon molecules contained in these gases; The wood, leaves and twigs subsamples were pulverized in a Marathon Electric mill series C20J020016.

According to the results of the biomass content in the trees for the different ages of the plantation, it was observed that 50% of the total biomass of the tree accumulates in the tree. That the biomass to carbon conversion factor is very close to the value of 0.50; the biomass content accumulated in the plantation is 45,399 tons, the carbon content is 24,042.77 tons and the carbon dioxide is 88,241.15 tons.

1. INTRODUCCIÓN

El efecto invernadero se origina por la acumulación de gases en la atmósfera debido a que las partículas permiten el paso de los rayos solares. Estas partículas viajan en una longitud de onda corta por lo que son “transparentes” a los Gases de Efecto Invernadero (GEI). Sin embargo, una vez que entran a la tierra, parte de esta energía se refleja en diferentes proporciones, dependiendo del lugar que la refleje, por ejemplo los océanos y los desiertos reflejan mayor cantidad de luz que las áreas provistas de vegetación.

El efecto invernadero que estos gases producen, a su vez causa el calentamiento de la tierra. Este fenómeno se denomina calentamiento global (Isaza y Campos, 2007). Los principales GEI de larga duración más importantes involucrados en este proceso son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) (OMM, 2017).

El dióxido de carbono (CO_2) es el gas más importante de los GEI y representa el 60% del total de los cambios en las concentraciones de todos ellos; la abundancia mundial en 2016, fue de 403.3 ± 0.1 ppm para el CO_2 , $1,853 \pm 2$ ppm para el metano (CH_4) y 328.9 ± 0.1 ppb para el óxido nitroso (N_2O), lo que representa el 145%, el 257% y el 122% de los niveles preindustriales (1950). El incremento récord de 3.3 ppm para el CO_2 de 2015 a 2016 fue mayor que el aumento previo de 2012 a 2013, y que la tasa de incremento promedio del último decenio. El aumento del CH_4 de 2015 a 2016 fue ligeramente menor al observado de 2014 a 2015, pero mayor que la media del último decenio. El aumento del N_2O de 2015 a 2016 también fue ligeramente menor que el observado de 2014 a 2015 y a la tasa de aumento medio de los últimos diez años (OMM, 2017).

El carbono se acumula en los ecosistemas forestales mediante la absorción de CO_2 atmosférico y su asimilación en la biomasa. El carbono se almacena tanto en la biomasa viva (madera en pie, ramas, follaje y raíces) como en la biomasa muerta (hojarasca, restos de madera, materia orgánica del suelo y productos forestales). Cualquier actividad que afecte al volumen de la biomasa en la vegetación y el suelo tiene capacidad para retener o liberar carbono de la atmósfera o hacia la atmósfera (FAO, 2001).

El proceso de retención de carbono en los sistemas vegetales, se refiere a la capacidad que poseen las plantas de tomar el dióxido de carbono atmosférico,

combinarlo con la radiación lumínica y el agua y transformarlo en moléculas de carbono durante la fotosíntesis (Perry, 1994). Las plantaciones forestales y los bosques naturales desempeñan un papel importante en el ciclo global del carbono, porque almacenan los fotoasimilados de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados que varía en función de la composición florística, edad y densidad de población (Andrasko, 1990).

La fijación de carbono a través de plantaciones forestales de rápido crecimiento es una alternativa para mitigar el incremento de dióxido de carbono atmosférico (Fearnside, 1999; Brown, 2002). Para estimar esta retención a nivel de planta es necesario contar con modelos matemáticos que relacionen las principales variables dasométricas (diámetro, área basal y altura) a evaluar en las especies con su biomasa y contenido de carbono (ecuaciones alométricas).

El rol activo e importante que juegan la vegetación y el suelo en el ciclo global del carbono y el cambio climático es reconocido internacionalmente. La vegetación y el suelo pueden actuar como una fuente y como un sumidero neto de GEI. Las alteraciones en las técnicas de gestión del uso de la tierra que dan lugar a cambios en las emisiones de GEI son un componente importante de las medidas reguladoras y voluntarias que se llevan a cabo a nivel mundial para mitigar el cambio climático (Winrock International, 2014).

2. ANTECEDENTES

Una plantación forestal comercial es el establecimiento y manejo de especies forestales en terrenos de uso agropecuario o terrenos que han perdido su vegetación forestal natural, con el objeto de producir materias primas maderables y no maderables, para su industrialización y/o comercialización (CONAFOR, 2015). Actualmente las plantaciones forestales son utilizadas como una forma para reducir los gases de efecto invernadero. Dichas estrategias se desarrollan por los 189 países que conforman las Naciones Unidas (ONU, 2015). Las plantaciones forestales se transforman así, en eficientes impulsoras de cambio hacia la promoción de los beneficios que significan la fijación de carbono en la madera, a la vez las plantaciones forestales han hecho que se reduzca el consumo de maderas provenientes de bosque natural por que ofrecen otros productos secundarios, así como múltiples bienes y servicios a las comunidades rurales y por ende a la sociedad civil (De Camino y Morales, 2013).

El carbono se acumula en la biomasa del ecosistema forestal a través de la fotosíntesis y es aproximadamente el 50%, en relación al peso seco. Este proceso hace que los bosques se consideren “sumideros de carbono” eficientes que permite equilibrar la concentración de este elemento (Torres y Guevara, 2005; Brey Meyer *et al.*, 1996; Shaver y Aber, 1996).

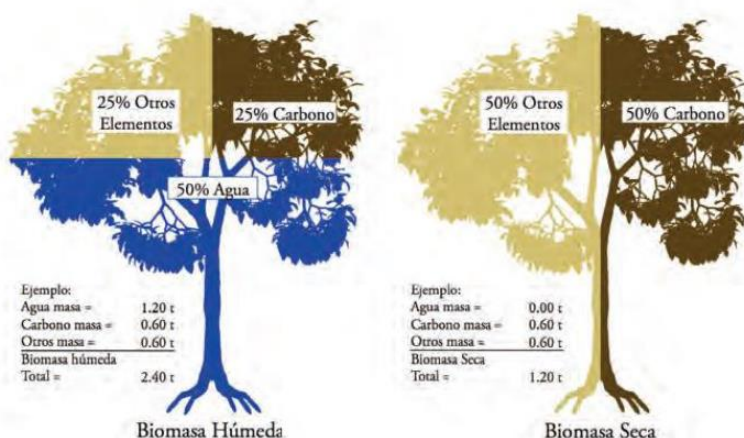


Figura 1. Proporción relativa de carbono (C), Agua (H₂O), y otros elementos (N, P, K, Ca, Mg, etc.) contenida en la biomasa (a) húmeda y (b) seca de los árboles.

Los árboles capturan el dióxido de carbono durante el proceso de fotosíntesis, para ser convertido en celulosa y permanecer almacenado en su estructura, es por ello que los bosques naturales y plantaciones forestales brindan servicios ecosistémicos como la fijación de carbono (Ávila *et al.*, 2001).

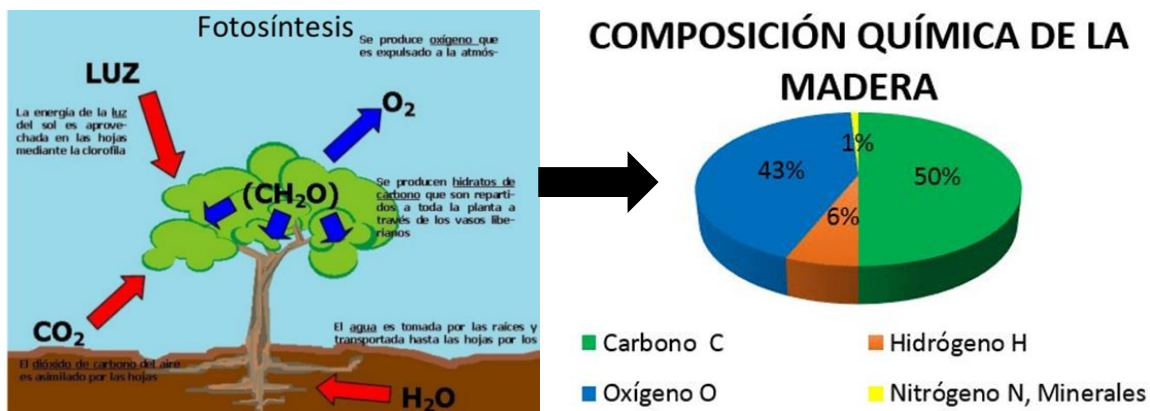


Figura 2. Proceso químico de la fotosíntesis.

La determinación del almacén y la fijación de carbono son esenciales para el ingreso al mercado mundial de bonos de carbono, donde existen pocas opciones. La compensación económica por captura y almacenamiento de carbono pueden obtenerse por diferentes vías, tales como los mecanismos de desarrollo limpio del Protocolo de Kyoto, REDD+ México, Dependencias Gubernamentales como CONAFOR, y a través del Mercado de Carbono.

Mercado de bonos de carbono: Es uno de los mecanismos que ha utilizado la economía ambiental para tratar de mitigar las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a nivel mundial. El Protocolo de Kyoto, negociado desde 1997, es el acuerdo internacional, en el cual un total de 37 países y la Comunidad Europea se comprometieron a disminuir sus emisiones GEI para el periodo 2008-2012 en un 5% respecto a 1990. Este protocolo ofrece las siguientes flexibilidades: mecanismo desarrollo limpio (MDL), mecanismo de acción conjunta (AC) y el comercio internacional de emisiones. El MDL es el más utilizado en el caso de los países en desarrollado, como México, ya que permite que, a través de proyectos, en países como el nuestro transfieran certificados de reducción de emisiones (CERs por sus siglas en inglés).

En el caso de México, el MDL es el que más se ha generado, sobre todo a partir de proyectos de energías renovables en donde han tenido participación importantes instituciones financieras como es el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Banco Santander Central Hispanoamericano (BSCH), Cooperación Andina de Fomento (CAF) y Banco Bilbao Vizcaya Argentaria (BBVA), las cuales han operado de manera importante el financiamiento a este tipo de proyectos de energía renovables con la posterior intermediación de los CERs.

El mercado de bonos de carbono en México ha comenzado a jugar un papel fundamental desde 1998, no obstante fue hasta el año 2008 a partir de la reforma energética aprobada se le otorgó una mayor importancia y nuestro país comenzó a figurar y a expandirse en el mercado de bonos de carbono (López *et al.*, 2016).

Actualmente cuenta con una plataforma llamada MéxiCO₂, donde las empresas podrán comenzar a invertir en los proyectos que se generen para cumplir con los objetivos de disminución de GEI a través de la compensación con el financiamiento en estos proyectos y la emisión de bonos de carbono (CERs) para aquellos inversores que decidan participar.

De acuerdo con la información emitida por la plataforma sobre financiamiento climático para América Latina y el Caribe, el MDL involucraba en el mes de abril de 2012 más de 8,100 proyectos en diferentes etapas, de los cuales 3,962 ya son proyectos registrados. De estos últimos (que requerirán en conjunto inversiones por más de 140 mil millones de dólares), aproximadamente el 38% ha dado lugar a la expedición de CERs. Para el periodo 2013-2020 se espera que se expidan 7,047 millones de CERs, alrededor de 881 millones en promedio en cada uno de los ocho años.

En América Latina y el Caribe los proyectos también están concentrados en unos pocos países: Brasil explica el 33% MDL (201 proyectos registrados) y México, el 23% (136 proyectos registrados). A continuación le siguen Chile con el 10% (54 proyectos), Colombia con el 7% (39 proyectos), Argentina y Perú con el 5% cada uno (28 y 27 proyectos registrados respectivamente), Honduras con el 3% (21 proyectos), Ecuador con el 3% (17) y Guatemala con el 2% (11 proyectos).

REDD+ México: Como una opción dentro de los esfuerzos globales de mitigación surge el mecanismo REDD+ bajo la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). La definición de REDD+ incluye la reducción de emisiones por deforestación, la reducción de emisiones por degradación forestal, el manejo sostenible de los bosques, la conservación y el aumento de las existencias de carbono en los bosques.

En México, REDD+ debe entenderse como un conjunto de líneas estratégicas que promueven de manera simultánea acciones de mitigación y adaptación, a través de un manejo integral del territorio que promueva el “Desarrollo Rural Sustentable (DRS)” bajo en carbono, y por tanto, que apunte a una convergencia entre la agenda ambiental y de desarrollo.

Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques (FCPF): Se lanza en el 2007 durante la Decimotercera Conferencia de las Partes en Bali y entra en operación en junio del 2008 como un fondo que brinda asistencia a los países en desarrollo para prepararse para REDD+.

Es decir, apoya a los países en sus esfuerzos para reducir las emisiones causadas por la deforestación y la degradación de los bosques, así como a promover la conservación de los stocks de carbono, manejar los bosques de manera sostenible y aumentar los stocks de carbono. La idea fundamental es darle más valor a los bosques en pie. El Banco Mundial asume las funciones de fideicomisario, secretaría y, en el caso de México, como socio implementador.

El programa cuenta con dos fondos:

- 1) El Fondo de Preparación que está diseñado para proporcionar fondos para el desarrollo de la estrategia, el trabajo de preparación técnica y de capacitación básica.
- 2) El Fondo de Carbono que se ha diseñado para promover y poner a prueba programas innovadores diseñados para ofrecer reducción de emisiones en una escala significativa.

El FCPF cuenta con un Comité de Participantes, una estructura de gobernanza inclusiva y efectiva, que está formado por un número igual de países con bosques tropicales y donantes; también incluye observadores; representantes de los pueblos indígenas, sociedad civil, organismos internacionales, ONU-REDD+, Secretaría de la CMNUCC y el sector privado.

Para poder acceder al Fondo de Preparación los países deberán entregar una serie de documentos que son revisados y evaluados por el Comité de Participantes y el Banco Mundial, entre ellos una Nota de Idea del Proyecto (R-PIN) y una Propuesta de Preparación (R-PP). México presentó dichos documentos en 2008 y 2010 respectivamente.

Con la Propuesta de Preparación (R-PP) a México se le autorizó el donativo de \$3.8 millones de dólares para el proceso de preparación de REDD. La propuesta de preparación se integra bajo los siguientes componentes:

Al ser parte del FCPF, el país se compromete a cumplir con las políticas operacionales del Banco Mundial en materia de salvaguardas y a realizar una Evaluación Estratégica, Social y Ambiental (SESA, por sus siglas en inglés) es una metodología analítica que incluye un proceso participativo y que apoya la fase de preparación de la Estrategia Nacional REDD+. Su alcance está enmarcado en la etapa de preparación para REDD+ y los gobiernos de cada país lideran el proceso de SESA.

El Fondo de Carbono, busca apoyar a los países que han realizado avances significativos en su preparación para REDD+ mediante el desarrollo de Iniciativas de Reducción de Emisiones para poner a prueba pagos por la reducción de emisiones verificada. México ya cuenta con elementos y avances que hacen viable el desarrollo de una Iniciativa de Reducción de emisiones en el país por lo que presentó ideas iniciales en Junio del 2013 y una Nota de Idea de Iniciativa de Reducción de Emisiones en Abril del 2014.

Programa Nacional Forestal (PRONAFOR) 2014- 2018: Acorde a los retos que plantea la nueva realidad del país en materia ambiental y forestal, establece como objetivo general promover el aprovechamiento sustentable de los recursos forestales del país, reactivar la economía del sector forestal y mejorar la calidad de vida de los habitantes de las zonas forestales, así como, mantener e incrementar la provisión de servicios ambientales a la sociedad y reducir las emisiones de carbono generadas por la deforestación y degradación forestal, considerando un modelo de intervención basado en una visión regional del territorio, a efecto de que los subsidios que otorga la federación a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) tengan mayores y mejores impactos sobre los diversos ecosistemas, actores y personas que habitan en las áreas forestales del país.

Objetivo: Apoyar mediante incentivos económicos a personas propietarias o poseedoras de terrenos forestales, que de manera voluntaria deciden participar en el programa de pago por servicios ambientales, así como fomentar la concurrencia de recursos económicos, humanos y operativos entre la CONAFOR y las personas usuarias de los servicios ambientales que estén interesadas en participar en la creación y fortalecimiento de mecanismos locales de pago por servicios ambientales, con el objeto de incorporar prácticas de buen manejo para promover la conservación y manejo sustentable de los ecosistemas, y fomentar la provisión en el largo plazo de los servicios ambientales, tales como la captación de agua, el mantenimiento de la biodiversidad y la captura y conservación del carbono, mismos que benefician a centros de población y el desarrollo de actividades productivas.

Pago por Servicios Ambientales: Son incentivos económicos dirigidos a las personas dueñas y poseedoras de terrenos forestales por los beneficios que la sociedad recibe de los ecosistemas forestales, tales como la captación de agua, el mantenimiento de la biodiversidad, la captura y conservación del carbono, los cuales benefician a centros de población y al desarrollo de actividades productivas.

Este concepto incluye las siguientes modalidades de apoyo:

Conservación de la Biodiversidad: Son acciones dirigidas a preservar la biodiversidad natural (flora y fauna silvestre) en ecosistemas forestales y sistemas agroforestales con cultivo bajo sombra, además de incentivar la transición de mejores usos de los recursos naturales, complementar el manejo sustentable de los mismos, incrementar la captura de carbono y en general proveer de servicios ambientales.

Componente: Servicios Ambientales		
Concepto	Modalidad	Monto máximo \$/hectárea/año
SA.1 Pago por servicios ambientales	SA.1.2 Conservación de la Biodiversidad	700.00

Fuente: DOF: 31/12/2015

Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad, entre los que se encuentran:

Servicios de abastecimiento: son los beneficios materiales que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo, el suministro de alimentos, agua, fibras, madera y combustibles.

Servicios de regulación: son los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos, por ejemplo, la regulación de la calidad del aire y la fertilidad de los suelos, el control de las inundaciones y las enfermedades y la polinización de los cultivos.

Servicios de apoyo: son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, por ejemplo, ofreciendo espacios en los que viven las plantas y los animales, permitiendo la diversidad de especies y manteniendo la diversidad genética.

Servicios culturales: son los beneficios intangibles que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo, la fuente de inspiración para las manifestaciones estéticas y las obras de ingeniería, la identidad cultural y el bienestar espiritual.

COP21, acuerdo de Paris (2015)

En la conferencia de naciones unidas sobre cambio climático, celebrada en el 2015 en Paris, Francia, se establecieron distintos acuerdos; como por ejemplo, evitar que el incremento de la temperatura media global supere los 2°C respecto a los niveles preindustriales y buscar, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1.5°C.

Reconocer la necesidad de que las emisiones globales toquen techo lo antes posible, asumiendo que esta tarea llevará más tiempo para los países en

desarrollo. Además, incluye la importancia de conseguir una senda de reducción de emisiones a medio y largo plazo, coherente con un escenario de neutralidad de carbono en la segunda mitad de siglo, es decir, un equilibrio entre las emisiones y las absorciones de gases de efecto invernadero.

Comprometer a todos los países a que, cada cinco años, comuniquen y mantengan sus objetivos de reducción de emisiones, así como la puesta en marcha de políticas y medidas nacionales para alcanzar dichos objetivos. Incluye un ciclo de revisión o sistema de ambición que establece que, cada cinco años (iniciando en 2023), es necesario hacer un balance del estado de la implementación del acuerdo respecto al objetivo de los 2°C.

Variables dasométricas

Diámetro (d):

Es una variable dasométrica que se mide a 1.3 m. En forma general el incremento en diámetro es mayor, cuando hay más espacio (menor densidad), en base a lo anterior por medio de algunas intervenciones silvícolas se regula este incremento como pueden ser los aclareos, en los que siendo intensivos por ejemplo se puede acelerar este incremento, mientras que con aclareos ligeros en bosques densos, el incremento en diámetro es menor. El incremento en diámetro al principio es menor, después aumenta hasta alcanzar una fase de alta actividad y disminuye gradualmente, llegando a ser muy reducido en los árboles viejos, así mismo con la edad el incremento anual en diámetro disminuye gradualmente y los anillos anuales tienden a ser más estrechos.

Altura (h):

Es el aumento que presenta un árbol o una masa de árboles en un período de tiempo determinado. Su punto de inflexión ocurre antes que el incremento en diámetro, área basal y volumen, es decir, su incremento culmina antes que las demás dimensiones dendrométricas del árbol. En el caso de las coníferas, se observa que desde la germinación a la fase de brinzal el crecimiento en altura es lento y durante las fases de vardazcal y latizal, este incremento es superior y al acercarse a la madurez empieza a disminuir hasta estabilizarse.

Área basal (g):

Es el resultado directo del incremento en diámetro y desde el punto de vista geométrico, es la superficie de una copa donde el diámetro exterior es el del árbol sin corteza y el grueso es el incremento radial.

Volumen (V):

Es el aumento que presenta un árbol o una masa forestal en un tiempo determinado, resultante del crecimiento en diámetro y altura; es la variable dendrométrica más útil para el manejo silvícola de los bosques así como de las plantaciones forestales comerciales.

Biomasa (B):

De acuerdo con el IPCC (2001), la biomasa es considerada como la masa total de organismos vivos en una zona o volumen determinado; a menudo se incluyen los restos de plantas que han muerto recientemente (biomasa muerta). Por otra parte la FAO (1998) considera que la biomasa es un elemento principal para determinar la cantidad de carbono almacenado en el bosque. La biomasa forestal permite elaborar previsiones sobre el ciclo mundial del carbono, que es un elemento de importancia en los estudios sobre el cambio climático.

Factor de expansión de biomasa (FEB):

Los factores de expansión de biomasa (FEB) utilizan los volúmenes o existencias reales provenientes de los inventarios forestales para estimar biomasa y carbono. Según distintos autores, el FEB se refiere a un coeficiente que expande el volumen comercial o total del fuste para obtener la biomasa total del árbol. Es decir, es la proporción directa entre la biomasa aérea total y la biomasa del fuste. Este factor variable depende de la especie, las condiciones ambientales, la densidad y edad de la vegetación, entre otros aspectos y se utiliza para estimar la biomasa total de un árbol cuando únicamente se cuenta con datos de volumen del fuste.

Densidad de la madera (D):

La densidad es la relación entre la masa y el volumen por otra parte la masa y el volumen de la madera están muy relacionadas con el contenido de agua, por lo que es imprescindible medir siempre la densidad en condiciones concretas. Normalmente, se mide con una humedad del 12%.

La densidad de la madera es propia de cada especie vegetal, depende de la cantidad y tipo de elementos celulares que la constituyen (Martínez, 2005). La mayoría de las propiedades físicas y mecánicas de la madera como: la dureza, el peso, la resistencia al impacto y a la abrasión están directamente relacionadas con la densidad; asimismo estas características se asocian con las condiciones climáticas que prevalecen en la región donde los individuos crecen (Rodríguez et al., 2015). De acuerdo con sus características, la madera puede ser empleada en la industria para la fabricación y/o producción de: escuadría, celulosa, triplay, postes, pilotes, leña, carbón y durmientes.

Carbono (C):

La estimación de la biomasa en los bosques es un tema relevante en relación con el problema del calentamiento global del planeta. En años recientemente se ha incrementado el interés por estudiar el papel de los bosques en los ciclos de elementos biogeoquímicos, especialmente del carbono y su relación con los gases de efecto invernadero. Se parte del principio de que aproximadamente 50% de la biomasa estimada es carbono y, por tanto, puede ser adicionada a la atmósfera como dióxido de carbono (CO_2) cuando este se corta y quema.

En el ámbito internacional se han iniciado estrategias para la mitigación del calentamiento global como las negociaciones de créditos de carbono. Para hacer realidad estas estrategias en proyectos forestales es necesario medir y monitorear el carbono almacenado, especialmente en el compartimiento de biomasa arriba del suelo (aérea). Las ecuaciones de biomasa son las más utilizadas para estimar la captura de carbono en bosques, y como consecuencia se adoptan en la mayoría de las investigaciones relacionadas con cuantificación de biomasa en los bosques naturales.

Dióxido de carbono (CO_2):

El dióxido de carbono cuya fórmula química es CO_2 es un compuesto químico que se encuentra mayormente en la atmósfera formando parte del ciclo del carbono que es vital para la vida en la Tierra. Este compuesto en la atmósfera, tiene la función de mantener el calor de la atmósfera evitando que la Tierra se congele. Tanto los animales como las plantas convierten su alimento combinándolo con oxígeno para generar energía para su crecimiento y actividades biológicas vitales como la respiración. En el proceso de la respiración, el CO_2 es liberado en la atmósfera.

El CO₂ liberado en la atmósfera es usado en la fotosíntesis de las plantas convirtiendo el CO₂, junto con el agua que absorben, en glucosa y oxígeno que son luego transformados en alimento.

Modelos alométricos:

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que relacionan la biomasa con variables del árbol medibles en pie, tales como el diámetro a 1.3 m, altura total y diámetro de copa, principalmente.

3. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar y cuantificar el carbono y bióxido de carbono en una plantación de Teca en el rancho San Miguel, Tizimín, Yucatán, México; con la finalidad de conocer realmente lo que una planta de teca (*Tectona grandis*) puede absorber de carbono y de dióxido de carbono, estudiando una plantación de 800 hectáreas; en cuya superficie se tienen cuatro diferentes edades, todo se realiza mediante la estimación del volumen, la biomasa, así como el contenido de carbono por planta, por edad, y por hectárea. Esto nos servirá para futuras recomendaciones y realizar acciones que contribuyan a la disminución del bióxido de carbono que se libera al ambiente. Siendo este (CO₂) el gas más importante de los (GEI). El cual se origina por la acumulación de gases en la atmósfera debido a que las partículas permiten el paso de los rayos solares; una vez que entran a la tierra, parte de esta energía se refleja en diferentes proporciones, dependiendo del lugar que la refleje, por ejemplo los océanos y los desiertos reflejan mayor cantidad de luz que las áreas provistas de vegetación. El efecto invernadero que estos gases producen, a su vez causa el calentamiento de la tierra. Este fenómeno se denomina calentamiento global (Isaza y Campos, 2007). Con dicha investigación, se aporta un grano de arena para disminuir el gran problema que estamos viviendo sobre el calentamiento global.

4. HIPÓTESIS

El porcentaje de contenido de carbono es variable en función a la edad en una plantación de *Tectona grandis* L. f.,

5. OBJETIVOS

5.1 GENERAL

Evaluación y cuantificación de carbono en una plantación de cuatro diferentes edades de la especie de teca (*Tectona grandis*) en Tizimín, Yucatán, México.

5.2 ESPECÍFICOS

Estimación del volumen en una plantación de *Tectona grandis*

Estimación de la biomasa de cada componente arbóreo (fuste, ramas, hojas) en una plantación de teca *Tectona grandis*

Cuantificación de carbono y bióxido de carbono almacenado en los árboles de la plantación de *Tectona grandis*.

6. METODOLOGÍA

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

Tectona grandis L. f., conocida comúnmente como teca o “teak” (en inglés), es un árbol caducifolio de tamaño grande, nativo del Sudeste de Asia, en donde alcanza 45 m de altura y desarrolla un tronco con contrafuertes al llegar a la madurez.

6.1.1. Clasificación taxonómica

Nomenclatura	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Dicotyledonae
Orden	Lamiales
Familia	Lamiaceae (Verbenaceae)
Género	Tectona
Especie	<i>Tectona grandis</i> L. f.

Fuente: Fonseca, 2004

6.1.2. Clima

La teca tolera una gran variedad de climas, pero crece mejor en condiciones tropicales moderadamente húmedas y calientes. La cantidad de lluvia óptima para la teca es de entre 1500 a 2000 mm por año, pero soporta precipitaciones tan bajas como de 500 mm y tan altas como de 5100 mm por año. La teca tolera grandes variaciones de temperatura, que varían entre 2 y 48 °C (Weaver, 1993).

6.1.3. Suelos y topografía

La teca crece a nivel del mar y hasta una altitud de 1,200 msnm. Se establece sobre una variedad de suelos y formaciones geológicas, pero el mejor crecimiento ocurre en suelos aluviales profundos, porosos, fértiles y bien drenados, con un pH neutral o ácido. La teca tolera condiciones de suelo muy extremas, siempre que exista un drenaje adecuado. Los factores limitantes más importantes en cuanto a los suelos son la poca profundidad, las capas duras, las condiciones anegadas, los suelos compactados o arcillas densas con un bajo contenido de Ca o Mg. Se ha demostrado también que la teca es sensible a las deficiencias de fosfatos. Las pendientes escarpadas, el drenaje pobre y las altitudes de más de 1,000 m también influyen en el crecimiento de forma negativa.

La teca crece bien en piedra arenisca porosa, pero sufre achaparramiento en cuarcita o en piedra arenisca dura y metamórfica. Se le encuentra también en suelos de granito, exquisitos y otras rocas metamórficas. Más aun, crece bien en suelos de piedra caliza en donde la roca se ha desintegrado para formar una marga profunda. El crecimiento es pobre sobre piedra caliza dura, en donde el suelo no es profundo (Weaver, 1993).

6.1.4. Usos

El duramen de la teca, que empieza a formarse durante el sexto año, cambia de color, de verde olivo a un pardo dorado, con la exposición y el secado. La madera tiene una fibra recta una textura uniformemente mediana y es aceitosa al tacto. Una fragancia ligera se puede detectar después del secado. La madera se seca al aire rápidamente y de manera satisfactoria, con una torcedura menor solamente, pero sin endurecimiento o cuarteadura superficial. Se seca bien pero lentamente al horno, con cuarteaduras, rajaduras o torceduras mínimas.

La madera es moderadamente dura y pesada, y es reconocida por su contracción poca y uniforme. La teca posee un peso específico promedio de 0.55 g por cm³ (Weaver, 1993).

6.2. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f) establecida en el año 2011, 2012, 2013 y 2016 ubicada en el municipio de Tizimín, Yucatán. El predio posee 841.0905 hectáreas de árboles de dicha especie (Figura 3). La investigación se basa a partir de muestreo de sitios permanentes de los últimos 5 años, obtenidos a partir de inventario forestal.

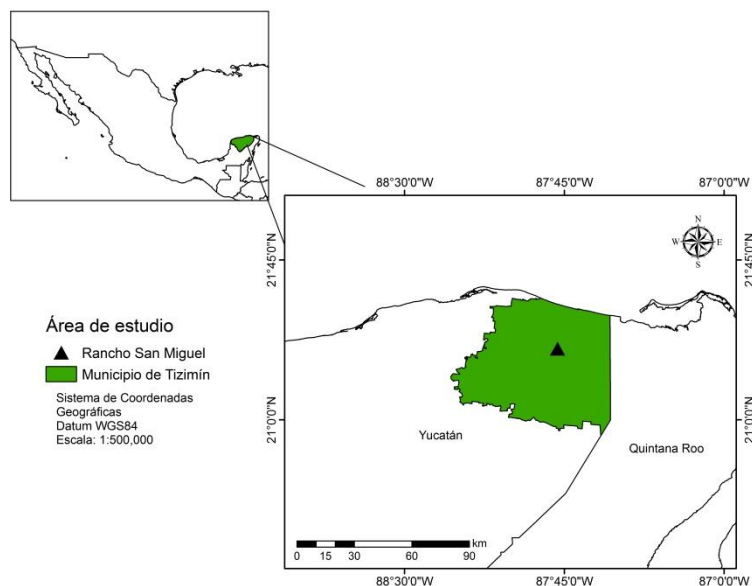


Figura 3. Ubicación de plantación forestal comercial de *T. grandis*.

6.3. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se especifican los procedimientos establecidos en la investigación para las diferentes fases: campo, laboratorio y gabinete.

6.3.1. Estimación del volumen fustal de la plantación de teca

Inventario forestal: Las variables diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (H), se obtuvieron mediante inventario forestal; bajo un diseño de muestreo aleatorio previamente determinado en la plantación y se encuentran establecidas 50 parcelas permanentes de muestreo con área de 992 metros cuadrados (m^2), de forma cuadrada que en total forman 49, 600 m^2 .

La toma de datos de campo se realizó en el año 2017, la muestra consistió en 3,059 árboles; efectuándose mediciones de variables dasométricas en cada árbol; los datos colectados fueron diámetros a 0.3 m sobre el nivel del suelo ($d_{0.3}$), diámetro a la altura del pecho ($d_{1.3}$) y diámetros a cada dos metros (d_2 , d_4 ,

$d_6, d_8, d_{10}, d_{12}, d_{14}$) hasta la altura total (h) con el Dendrómetro Criterion RD 1000®.

Para la cubicación de trozas se formaron secciones de dos metros de largo, con un diámetro menor y mayor conocidos, fue calculado el volumen con la fórmula de Smalian:

$$V_i = \sum_{i=1}^n \frac{g_i + g_{i+1}}{2} \cdot L_i$$

Dónde:

V_i = Volumen de las secciones intermediarias (m^3);

g_i = Área basal en la i-ésima posición (m^2);

L_i = Largo de la sección en la i-ésima posición (2 metros).

Para la obtención del volumen total con corteza individual se realizó la sumatoria del volumen de cada sección:

$$V = V_0 + \sum_{i=1}^n V_i + V_c$$

Dónde:

V = Volumen total con corteza (m^3);

V_0 = Volumen del tocón (m^3) hasta 0.3 metros desde el nivel del suelo, constituyendo el volumen del cilindro;

V_c = Volumen de la punta superior del árbol (m^3) calculado por la ecuación del cono, de largo igual a la sección considerada, donde:

$$V_c = g_n \cdot L_n \cdot \frac{1}{3}$$

Dónde:

g_n = área basal del cono (m^2);

L_n = Largo del cono (m): $\frac{1}{3}$ = constante utilizada para el volumen del cono.

6.3.2. Muestreo para determinación de biomasa y densidad de la madera

En este procedimiento se recolectaron muestras y submuestras del arbolado. Posteriormente en el laboratorio de carbono se secaron las muestras y se determinaron las variables: densidad de la madera, factor de expansión de biomasa y el factor de conversión de biomasa a carbono de la estructura arbórea, como se describe a continuación:

6.3.2.1. Recolección de muestras

Para la toma de datos, se empleó la metodología propuesta por Winrock International (2014), se obtuvieron muestras de 32 árboles de las diferentes edades, que fueron derribados y seccionados.

6.3.2.2. Variables para la estimación de biomasa

Una vez derribado el árbol se realizaron las siguientes mediciones:

- a.- Longitud del árbol (desde el tocón hasta la parte superior de la copa) (m)
- b.- Longitud del tronco (desde el tocón hasta la primera rama principal) (m)
- c.- Diámetro del tocón (cm)
- d.- Diámetro a la altura del pecho (cm)
- e.- Diámetro en el centro del tronco (cm)
- f.- Diámetro en la parte superior del tronco (cm) (Figura 4).

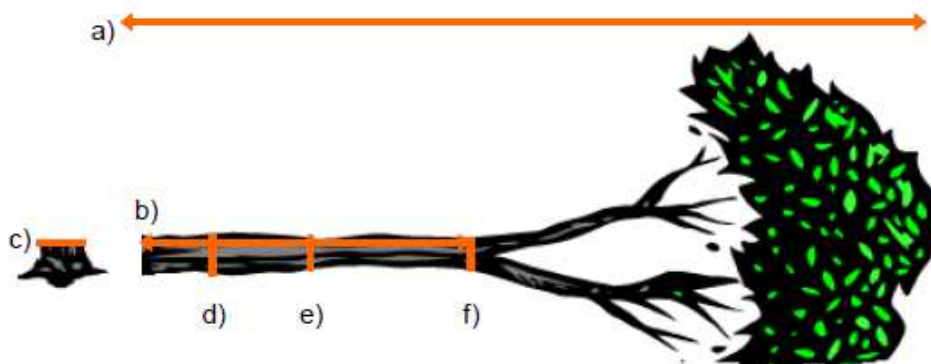


Figura 4. Ubicación de las medidas siguientes al derribo de árboles.
Fuente: Winrock International (2014).

Se dividieron las clases de tamaño del árbol y los pesos estimados.

Para la estimación del volumen del tronco:

- 1.- Se midió la longitud total del tronco
- 2.- Se midió el diámetro a intervalos de 2 m a lo largo del tronco hasta la primera rama. Se registró el diámetro y la longitud de cada intervalo (Figura 5).

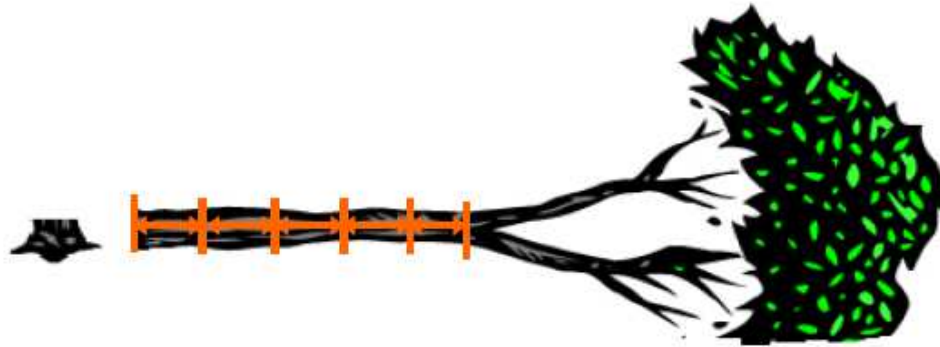


Figura 5. Medidas de diámetro y longitud a lo largo del fuste del árbol.
Fuente: Winrock International (2014).

6.3.2.2.1. Submuestras del fuste

Se obtuvieron 3 submuestras con un grosor de 2.5 cm en forma de rodaja de cada árbol para determinar la biomasa, el fuste fue seccionando obteniendo la primer rodaja en el tocón, la segunda rodaja en la parte media del fuste y la tercera rodaja en la parte alta del árbol, se obtuvo el peso húmedo con una báscula colgante, fueron identificadas con un código para su traslado al laboratorio

6.3.2.2.2. Ramas

Se clasificaron por diámetros y se apilaron, se pesaron con una báscula colgante, se tomó como peso húmedo de los árboles evaluados. Se obtuvieron 3 submuestras de cada árbol que fueron colocadas en bolsas de papel con capacidad de 3 kilogramos e identificadas con un código para su traslado al laboratorio.

6.3.2.2.3. Hojas

El muestreo se realizó de acuerdo a los puntos cardinales (N, S, E, W). Se separaron de las ramillas para colocarlas en bolsas de papel con capacidad de 3 kg, se identificaron con un código y se procedió a realizar en peso de cada submuestras, se obtuvieron 3 submuestras de cada árbol las cuales fueron trasladadas al laboratorio.

6.3.2.3. Densidad de la madera

Para estimar la densidad de la madera se obtuvieron submuestras de 12 árboles representativos de las parcelas de muestreo (edad, diámetro normal, altura total). Las submuestras de madera se extrajeron del fuste principal en varias ubicaciones a lo largo de su longitud.

Se cortaron 3 submuestras de rodajas de diferentes secciones del fuste con un grosor de 15 cm; la primera rodaja en el tocón, la segunda rodaja en la parte media del fuste y la tercera rodaja en la parte alta del fuste. Se identificaron las submuestras con un código y parte del árbol muestreada para posteriormente trasladarlas al laboratorio.

6.3.3. Fase de laboratorio

El procedimiento se llevó a cabo en los Laboratorios de Carbono, Laboratorio de Tecnología de la Madera y Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

6.3.3.1. Secado de submuestras para la determinación de biomasa

Las submuestras de los componentes del árbol (fuste, hojas y ramas) se trasladaron al Laboratorio de Carbono de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL., donde se secaron a una temperatura de 75 °C en un horno digital de secado marca Riossa modelo HCF-102-D durante 72 horas. Cada 24 horas se pesaron en una balanza de calibración electrónica con peso máximo de 2 kg, hasta alcanzar un peso constante.

Se empleó la metodología propuesta por Castellanos *et al.*, (2010) donde mencionan que para cuantificar la biomasa total de cada parte vegetativa analizada (hojas, ramas y ramillas); es necesario utilizar el peso seco final (biomasa) de las submuestras recolectadas, relacionándolas con el peso húmedo tanto de las submuestras como las del total del árbol pesadas durante la fase de campo. Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$BH = PFH (kg) * Promedio \left(\frac{Psm (kg)}{Pfm (kg)} \right)$$

$$Bram = PFRam (kg) * Promedio \left(\frac{Psmram (kg)}{Pfmram (kg)} \right)$$

$$Bras = PFRas (kg) * Promedio \left(\frac{Psmras (kg)}{Pfmras (kg)} \right)$$

Dónde:

BH= Biomasa de hojas;

Bram= Biomasa de ramas;

Bras= Biomasa de ramillas;

PFH= Peso fresco total de las hojas;

PFRam= Peso fresco total de las ramas en kg;

Promedio= Promedio de las 3 submuestras;

Psm= Peso seco de la submuestras de hojas en kg;

Psmram= Peso seco de la muestra de ramas en kg;

Pfm= peso fresco de la submuestras de ramas en kg;

Pfmram= Peso fresco de la submuestras de ramas en kg;

Pfras= Peso fresco total de las ramillas en kg;

Psmras= Peso seco de la muestra de la ramilla en kg;

Pfmras= Peso fresco de la muestra de las ramillas en kg.

6.3.3.2. Secado de submuestras para determinación de densidad de madera Las submuestras de las rodajas del fuste se trasladaron al Laboratorio de Tecnología de la Madera, de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL. El material en estado verde, se apiló bajo techo y se acondicionó hasta alcanzar 12% de contenido de humedad a continuación, se elaboraron las probetas definitivas, 135 de 5 cm x 5 cm x 10 cm de longitud para determinar la densidad de la madera.

Se siguió la metodología sugerida por las normas COPANT 459 (Acondicionamiento de las maderas destinadas a ensayos físicos y mecánicos); 460 (Método de determinación de contenido de humedad en maderas); 461 (Cálculo del peso específico en maderas) (COPANT, 1972).

La norma COPANT 460 precisa el método para la determinación de humedad de la madera mediante la ecuación siguiente:

$$CH = \frac{Ph - Po}{Po} * 100$$

Dónde:

CH= Contenido de humedad (%);

Ph= Peso de la madera húmeda (g);

Po= Peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g).

El método para calcular la densidad de la madera se basa en la norma COPANT 461; una vez extraídas se midieron con un calibrador (vernier) y se pesaron en una báscula digital Ohaus con precisión de 0.0001 g. Posteriormente se introdujeron en una estufa de secado Mapsa modelo HDP-334 a 105 °C, donde se les monitoreo hasta obtener peso constante, se midieron de nuevo y se pesaron para registrar los pesos y volúmenes anhidros.

6.3.3.3. Determinación de carbono

Las submuestras de los componentes del árbol (madera, corteza, hojas y ramas) se trasladaron al Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales, UANL, se pulverizaron 12 submuestras de cada componente (madera, hojas y ramillas) en un molino marca Marathon Electric serie C20J020016, se colocaron en bolsas de polietileno etiquetadas con un código con un peso promedio de 90 gr cada una. Posteriormente se pesaron 2 mg de cada submuestras en una balanza, preparando un total de 36 submuestras de 12 árboles elegidos de acuerdo al diámetro a la altura del pecho, puesto que se tiene como objetivo primordial abarcar la mayor variabilidad diamétrica de toda la muestra. La concentración de carbono total se determinó con un equipo analítico denominado Solids TOC Analyzer modelo 1020A de O-I-Analytical; éste determina las concentraciones en muestras sólidas mediante combustión completa, a una temperatura de 900 °C, los gases producto de la combustión son medidos a través de un detector de infrarrojo no dispersivo que contabiliza las moléculas de carbono contenidas en estos gases.

6.3.4. Análisis de la información

Consistió en trabajo de gabinete, se tabuló la información recolectada en campo así como los datos obtenidos en laboratorio.

6.3.4.1. Ecuaciones para el cálculo de variables

6.3.4.1.1. Densidad básica

Parte alta, media y baja del fuste g/cm^3 , se aplicaron las siguientes relaciones:

$$D_b = \frac{P_o}{V_v}$$

Donde:

D_b = Densidad básica (g cm^3);

P_o = Peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g);

V_v = Volumen verde de la probeta (cm^3).

$$D_v = \frac{P_v}{V_v}$$

Donde:

D_v = Densidad verde (g cm^3);

P_v =Peso verde de la madera (g);

V_v =Volumen verde de la probeta (cm^3).

$$D_o = \frac{P_o}{V_o}$$

Donde:

D_o = Densidad seca (g cm^3);

P_o = Peso anhidro (secado en estufa) de la madera (g);

V_o = Volumen anhidro de la probeta (cm^3).

6.3.4.1.2. Biomasa del fuste

$$BF = D_b * Vol\ fustal * 1,000$$

Donde:

BF = Biomasa del fuste (kg);

D_b = Densidad básica (g/cm^3);

Vol fuste= Volumen fustal (m³).

6.3.4.1.3. Biomasa total del follaje

$$BT_{follaje} = PFT_{follaje} * \frac{PSM_{follaje}}{PFM_{follaje}}$$

Donde:

BT follaje= Biomasa total del follaje (kg);

PFT follaje= Peso fresco total del follaje (kg);

PSM follaje= Peso seco de la muestra del follaje (kg);

PfM follaje= Peso fresco de la muestra del follaje (kg).

6.3.4.1.4. Biomasa total de ramas

$$BT_{ramas} = PFT_{ramas} * \frac{PSM_{ramas}}{PFM_{ramas}}$$

Donde:

BTramas= Biomasa total de ramas (kg);

PFT ramas= Peso fresco total de ramas (kg);

PSM ramas= Peso seco de la muestra de ramas (kg);

PFM ramas= Peso fresco de la muestra de ramas (kg).

6.3.4.1.5. Biomasa total de ramillas

$$BT_{ram} = PFT_{ramillas} * \frac{PSM_{ramillas}}{PFM_{ramillas}}$$

Donde:

BT ramillas= Biomasa total de ramillas (kg);

PFT ramillas= Peso fresco total de ramillas (kg);

PSM ramillas= Peso seco de la muestra de ramillas (kg);

PFM ramillas= Peso fresco de la muestra de ramillas (kg).

6.3.4.1.6. Biomasa total árbol

Los resultados de los cálculos se tabularon para obtener biomasa total por encima del suelo de cada árbol, mediante sumatoria de los pesos secos de cada componente (fuste, ramas, ramillas y hojas)

$$BT \text{ árbol} = BF + BT \text{ follaje} + BT \text{ ramas} + BT \text{ ramillas}$$

Donde:

BT árbol= Biomasa total árbol (kg);

BF= Biomasa del fuste (kg);

BT follaje= Biomasa total del follaje (kg);

BT ramas= Biomasa total de ramas (kg);

BT ramillas= Biomasa total de ramillas (kg).

6.3.4.1.7. Factor de expansión de biomasa

Se calculó a partir de los datos de biomasa previamente estimados. Se utilizó la siguiente ecuación para su cálculo:

$$FEB = \frac{B \text{ total}}{B \text{ fuste}}$$

Donde:

FEB= Factor de expansión de biomasa;

B total= Biomasa total (kg);

B fuste= Biomasa fuste (kg).

6.3.4.1.8. Relación biomasa radical-biomasa total

Para la relación entre biomasa aérea y raíces se utilizó un valor de 0.10 recomendado por Mac Dicken (1997), el cual ofrece resultados conservadores.

6.3.4.1.9. Factor de conversión de carbono

Es el porcentaje de carbono, en masa, que tiene la madera es decir; Carbono 50%; Oxígeno 41%; Hidrógeno 6%; Nitrógeno 1% y Cenizas 2%. Por tanto la cantidad de Carbono por tonelada de materia seca se aproxima a 500 kg (50%) (Norverto, 2006).

Se calculó con la siguiente ecuación:

$$C_{total} = \frac{B}{1000} * FCBC$$

Donde:

C total= Carbono total (ton);

B= Biomasa (kg);

FCBC= Factor de conversión de biomasa a carbono.

6.3.4.1.10. Cuantificación de carbono y dióxido de carbono almacenado en los árboles

Para cuantificar el carbono en los árboles se efectuó muestreo destructivo, se utilizó la siguiente ecuación:

$$C_{acumulado} (tC/\text{árbol}) = [(V_{cc} * D * FEB)] * [(1.1) * 0.5]$$

Para cuantificar dióxido de carbono en los árboles se efectuó muestreo destructivo, se utilizó la siguiente ecuación:

$$CO_2_{acumulado} (tCO_2/\text{árbol}) = [(V_{cc} * D * FEB) * ((1.1) * FC)] * [FCO_2]$$

Dónde:

V_{cc}= Volumen con corteza del fuste, es decir, del tronco del árbol sin considerar ramas ni raíces;

D= Densidad de materia seca (g/cm³) del árbol recién cortado;

FEB= Factor de expansión de biomasa, parámetro o función que permite estimar el volumen aéreo del árbol a partir de su volumen maderable, es decir, multiplicando el V_{cc} por el FEB obtendremos el volumen de todo el árbol;

Factor R= Relación entre biomasa aérea y raíces;

Factor FC= Factor de conversión de tonelada de materia seca (tms) a tonelada de Carbono (tC);

FCO₂= Proporción molecular para pasar de carbono (C) a dióxido de carbono (CO₂).

6.3.4.1.11. Productividad

El índice de sitio es una medida del potencial de productividad de una especie forestal en un sitio específico, en donde a mejor calidad de sitio mayor será su producción (Clutter *et al.* 1983). Un modelo de índice de sitio permite cuantificar el potencial de producción en cada rodal evaluado, definir la calidad del sitio desde excelente hasta muy pobre y realizar comparaciones entre ellos. Los modelos de índice de sitio permiten evaluar y clasificar los sitios forestales, según la capacidad productiva de la especie forestal plantada. Comúnmente, los métodos de predicción parten de la altura a una edad conocida, la cual permite estimar el índice de sitio o el volumen de producción esperado.

Con el objeto de generar las tablas de productividad correspondientes, el esquema de índice de sitio se realizó mediante el uso de la información relativa a 120, 230 y 120 árboles dominantes de la plantación de *Tectona grandis* para las respectivas edades (2011, 2012 y 2013) a mediciones repetidas de 50 parcelas. Se empleó el modelo de Schumacher (1939) de dos parámetros, es un modelo lineal que permite la estimación de una familia de curvas para relacionar la altura con la edad el cual permitió definir desde los mejores sitios hasta los más pobres. Este modelo se desarrolló para la variable respuesta Hd, transformada a logaritmo mediante el ajuste de la ecuación:

$$\ln(Hd) = \beta_0 + \beta_1 E^{-1} + \varepsilon$$

Dónde:

Hd= Altura dominante del rodal a la edad E

E= edad del rodal

B₀ y B₁= Parámetros del modelo

A fin de obtener el volumen de árbol individual, se utilizó la ecuación de Spurr Potencial.

$$V = \beta_0 * (d^2h)^{\beta_1}$$

Dónde:

V= Volumen (m³)

d= Diámetro normal (cm)

h= Altura (m)

B0 y B1= Parámetros del modelo

El índice de sitio (S) se estima para cada parcela por medio del modelo ajustado. Para esta estimación se utilizó la última medición de la parcela. Considerando una edad de referencia de 16 años, se puede calcular el índice de sitio mediante la ecuación:

$$\ln(S) = \ln(Hd) + \beta_0 * ((E + 1))^{-1} - E0^{-1}$$

Dónde:

Hd =Altura de los árboles dominantes (m)

IS = Índice de Sitio (m)

E =Edad del arbolado (años)

E0 = Edad base (años)

Para determinar el incremento corriente anual (ICA) y el incremento medio anual (IMA) se utilizaron las variables de edad (e) y altura dominante (H0) para las tres edades analizadas (2011, 2012 y 2013). En el caso del ICA se determinó mediante la ecuación siguiente:

$$ICA = (H0_2 - H0_1)/(e)$$

Dónde:

ICA= Incremento corriente anual

HO₁= Altura dominante edad anterior

HO₂= Altura dominante edad posterior

e= Edad

Para el IMA se utilizó la ecuación:

$$IMA = (H0/e)$$

Dónde:

IMA= Incremento medio anual

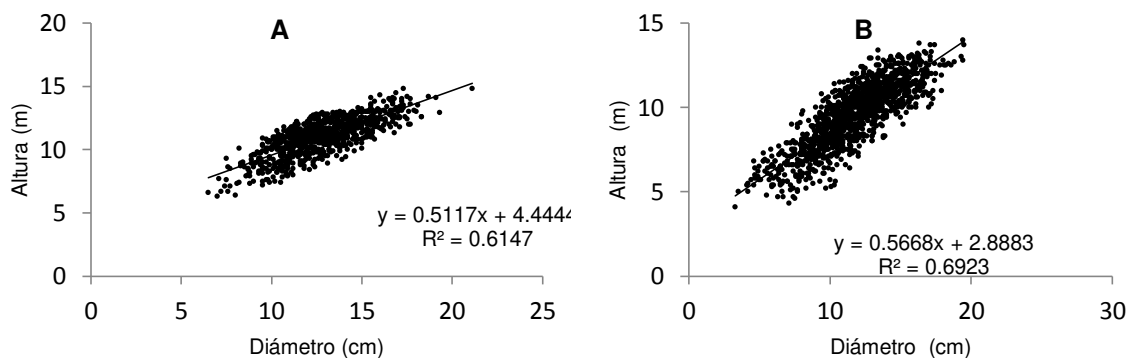
HO= Altura dominante

e= Edad

7. RESULTADOS

7.1. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN EXISTENTE EN LA PLANTACIÓN

La estimación del volumen total existente en la plantación de teca se realizó con base en inventario efectuado en noviembre de 2017, se recolectaron datos dasométricos de 3,059 árboles en las parcelas permanentes de muestreo previamente establecidas. El Rancho San Miguel cuenta con un total de 841.0905 ha de plantación de teca de 4 edades (año de establecimiento 2011, 2012, 2013, y 2016); se generaron gráficas de dispersión para las cuatro edades de la plantación de *T. grandis.*, que de manera singular permiten ver la tendencia de datos y el comportamiento de las variables independientes sobre la variable dependiente, de esta manera se determina si la ecuación es lineal, cuadrática, exponencial o logarítmica (Figura 6).



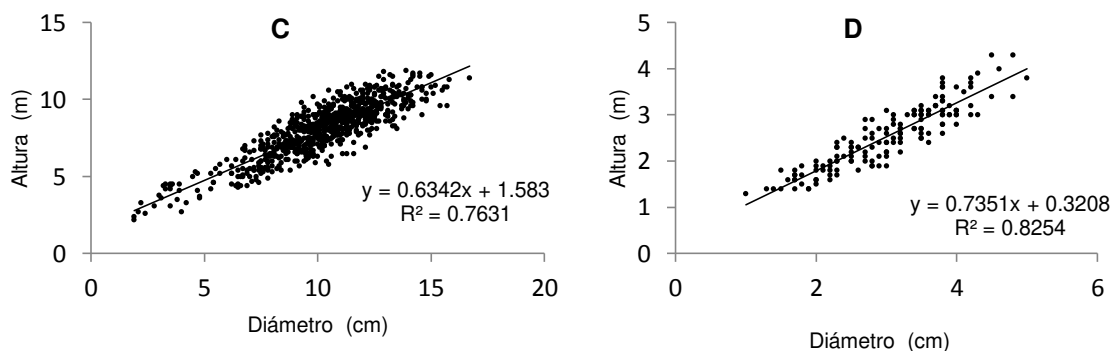
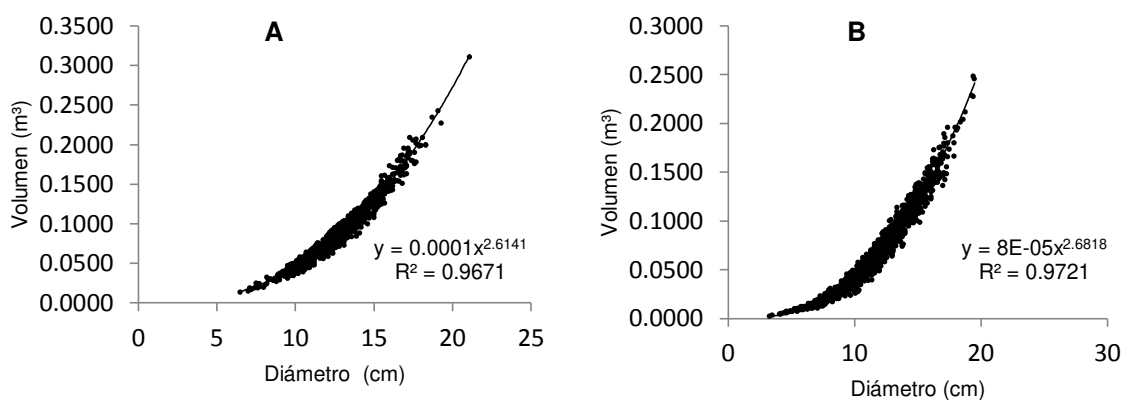


Figura 6. Relación lineal del diámetro y la altura en las 4 edades(A 2011, B 2012, C 2013, D 2016) de *T. grandis*.

Se verificó la forma de la línea o curva del conjunto de datos, mediante una gráfica de puntos, y de esa forma se eligió la ecuación que represente la verdadera relación entre las variables. El tipo de gráfica a que da lugar la relación de diámetro normal y volumen, es el de una curva parabólica o exponencial, cuya forma es cóncava hacia arriba en las diferentes edades analizadas (Figura 7).



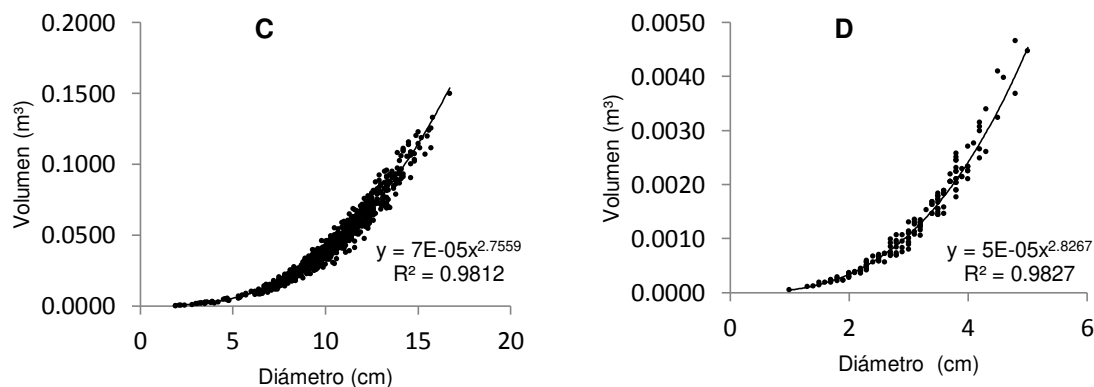


Figura 7. Dispersión de datos entre volumen y diámetro de *T. grandis* (A 2011, B 2012, C 2013, D 2016).

Los resultados del inventario forestales se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Variables dasométricas promedio de *Tectona grandis*.

Variables	Año de establecimiento			
	2011	2012	2013	2016
Diámetro (cm)	12.79	11.74	10.33	3.05
Altura (m)	10.99	9.54	8.13	2.56
Área basal (m²/ha)	10.812	9.310	7.207	0.639
Volumen (m³/ha)	73.902	57.045	37.815	1.100

7.2. DENSIDAD DE LA MADERA DE *Tectona grandis*.

El proceso para determinar la densidad de la madera de *T. grandis* se realizó en 135 probetas, para las diferentes edades que se localizan en la plantación, los ensayos se efectuaron con un contenido de humedad de 12% (Cuadro 2).

Cuadro 2. Densidad de la madera de *Tectona grandis*.

Densidad g/cm ³	*A			*B			*C			*D		
	Pro m.	Má x.	Mí n.	Pro m.	Má x.	Mí n.	Pro m.	Má x.	Mí n.	Pro m.	Má x.	Mí n.
Básica	0.48	0.5 3	0.3 8	0.48	0.5 8	0.4 0	0.46	0.5 6	0.3 9	0.42	0.4 8	0.3 7
Verde	1.02	1.1 3	0.8 2	1.03	1.1 5	0.9 2	1.04	1.1 4	0.9 5	1.09	1.3 6	0.8 8
Anhidra	0.56	0.6 8	0.4 7	0.54	0.6 9	0.4 4	0.54	0.8 1	0.4 2	0.48	0.5 4	0.4 1

*Año de establecimiento: A, 2011; B 2012, C 2013, D 2016

7.3. BIOMASA DE CADA COMPONENTE ARBÓREO

Los resultados de la biomasa de los componentes arbóreos y la biomasa total se presentan en el Cuadro 3. Del análisis de contenido de biomasa en los árboles para las distintas edades de la plantación se observa que el fuste es el componente vegetal que mayor cantidad de biomasa almacena y las hojas son la estructura vegetal que menor biomasa almacena (Figura 8).

Cuadro 3. Biomasa promedio por componentes de árboles de *T. grandis*.

Año de establecimiento	Biomasa Hojas (kg)	Biomasa Ramas (kg)	Biomasa Fuste (kg)	Biomasa Total (kg)
2011	5.696	12.068	15.243	33.025
2012	4.911	12.671	17.851	35.451
2013	1.930	4.581	7.299	13.824
2016	1.270	1.923	3.282	6.498

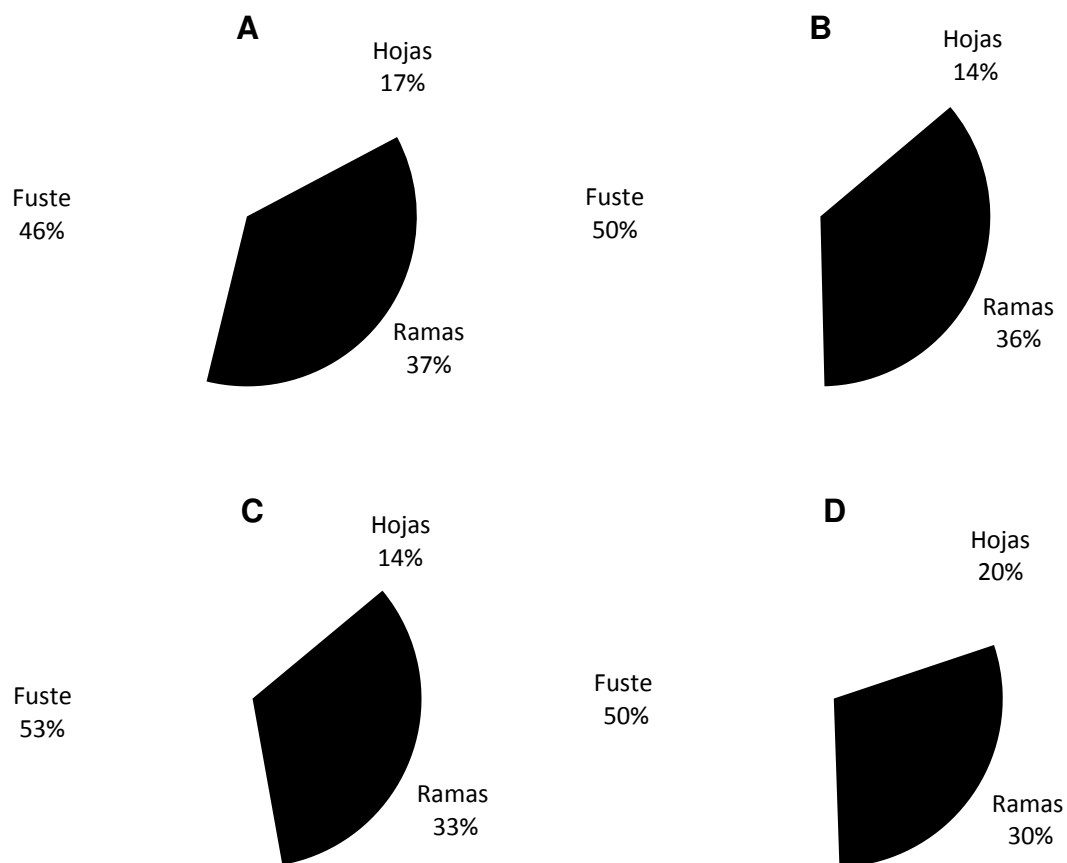


Figura 8. Porcentaje de biomasa contenida en la estructura aérea de *T. grandis* (A 2011, B 2012, C 2013, D 2016).

7.4. FACTOR DE EXPANSIÓN DE BIOMASA (FEB)

El cálculo del FEB, se realizó dividiendo la biomasa aérea total entre la biomasa seca del fuste, el factor de expansión de biomasa se utiliza para estimar a partir del volumen fustal, la cantidad de biomasa extra que tiene el árbol por sus componentes de ramas, ramillas y hojas. Se calcularon las medidas de resumen del FEB para *T. grandis* para las diferentes edades que se localizan en la plantación (Cuadro 4).

Cuadro 4. Cálculo del factor de expansión de biomasa *Tectona grandis*.

Año de establecimiento	FEB	N	Max	Min	DE
2011	2.14	7	2.39	1.65	0.257
2012	2.02	8	2.62	1.38	0.450
2013	1.93	10	2.34	1.43	0.347
2016	2.25	7	2.73	1.65	0.433

FEB= Factor de expansión de biomasa. N= Numero de datos observados. Max= Máximo. Min= Mínimo. DE= Desviación estándar.

7.5. FACTOR DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A CARBONO

En el cuadro 5 se presentan los resultados del análisis de carbono realizado en laboratorio, se determinó el factor de conversión de la biomasa a carbono para cada edad de la plantación.

Cuadro 5. Resultados del análisis de carbono por componentes de árboles de *Tectona grandis*.

Año de establecimiento	Lote	Componen te	%C	Factor de conversión de biomasa a carbono
2011	1	Hojas	32.62	0.48
	1	Madera	61.11	
	1	Corteza	47.26	
	2	Hojas	32.21	
	2	Madera	61.11	
	2	Corteza	47.76	
	4	Hojas	42.83	
	4	Madera	53.63	
	4	Corteza	52.17	
2012	5	Hojas	45.96	0.48
	5	Madera	52.65	
	5	Corteza	44.23	
	6	Hojas	47.39	
	6	Madera	55.47	

	6	Corteza	39.73	
	7	Hojas	46.05	
	7	Madera	55.98	
	7	Corteza	43.36	
	13	Hojas	49.81	
	13	Madera	52.42	
	13	Corteza	48.55	
	14	Hojas	47.29	
	14	Madera	52.65	
	14	Corteza	46.46	
2013	15	Hojas	48.75	0.49
	15	Madera	54.22	
	15	Corteza	43.43	
	16	Hojas	46.87	
	16	Madera	54.87	
	16	Corteza	44.69	
	8A	Hojas	46.47	
	8A	Madera	53.36	
	8A	Corteza	43.24	
2016	9A	Hojas	43.22	0.47
	9A	Madera	53.86	
	9A	Corteza	42.54	

7.6. FIJACIÓN DE CARBONO Y DIÓXIDO DE CARBONO

Teniendo como base el conjunto de datos de 3,059 árboles de *Tectona grandis* procedentes de 50 parcelas permanentes de muestreo; se presentan los valores de los parámetros del modelo ajustado así como sus indicadores de bondad de ajuste y nivel de confiabilidad para la fijación de carbono (Cuadro 6) y fijación de dióxido de carbono (Cuadro 7) para cada año de establecimiento (2011, 2012, 2013, y 2016). Los modelos alométricos se ajustaron con el método de mínimos cuadrados ordinarios, con el programa SAS®. Los modelos explican valores porcentuales altos (98%) de la variabilidad total presente en la variable dependiente, y una alta significancia en cada uno de sus parámetros (Cuadro 6 y 7); por lo que se consideran apropiados para predecir con mayor precisión el carbono almacenado en función de las variables; volumen total de fuste (V_{cc}), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total ($1+R$), factor de conversión (FC), y el dióxido de carbono almacenado en función de las variables; volumen total de fuste (V_{cc}), densidad

(*D*), factor de expansión de biomasa (*FEB*), relación biomasa radical-biomasa total (*1+R*), factor de conversión (*FC*) y fijación de CO₂.

Cuadro 6. Valores estadísticos de los parámetros del modelo matemático evaluado en la cuantificación del carbono acumulado en *Tectona grandis*.

Año de establecimiento	R^2_{adj}	SCE	CME	β_i	Valor estimado	Error estándar	Prob >T	REMC	DW
2011	0.9890	0.00127	0.0000016	0	0.000058	0.0000018	<0.001	0.00125	1.54
				1	1.597781	0.00599	<0.001		
2012	0.9898	0.0021	0.0000016	0	0.000075	0.0000021	<0.001	0.00126	1.53
				1	1.563327	0.00531	<0.001		
2013	0.9913	0.00051	0.0000007	0	0.000101	0.000003	<0.001	0.000823	1.49
				1	1.521113	0.00622	<0.001		
2016	0.9940	0.0000002	0.000000002	0	0.000108	0.0000030	<0.001	0.000039	1.98
				1	1.487801	0.0105	<0.001		

R^2_{adj} =Coeficiente de determinación ajustado; SCE=Suma de cuadrado del error. CME=Cuadrado medio del error; β_i = Parámetros estimados; REMC=Raíz del cuadrado medio del error; DW=Durbin Watson.

Cuadro 7. Valores estadísticos de los parámetros del modelo matemático evaluado en la cuantificación del dióxido de carbono acumulado en *Tectona grandis*.

Año de establecimiento	R^2_{adj}	SCE	CME	β_i	Valor estimado	Error estándar	Prob >T	REMC	DW
2011	0.9889	0.00127	0.000002	0	0.000016	0.0000049	<0.001	0.00125	1.54
				1	1.597781	0.00599	<0.001		
2012	0.9898	0.0021	0.000002	0	0.000021	0.000006	<0.001	0.00126	1.53
				1	1.563327	0.00531	<0.001		
2013	0.9913	0.00051	0.0000007	0	0.000028	0.000008	<0.001	0.000823	1.49
				1	1.521135	0.00622	<0.001		
2016	0.9940	0.00000023	0.000000002	0	0.000029	0.000008	<0.001	0.000039	1.97
				1	1.487802	0.0105	<0.001		

R^2_{adj} =Coeficiente de determinación ajustado; SCE=Suma de cuadrado del error. CME=Cuadrado medio del error; β_i = Parámetros estimados; REMC=Raíz del cuadrado medio del error; DW=Durbin Watson.

Los resultados de la cuantificación de biomasa, carbono almacenado y el dióxido de carbono almacenado para las cuatro edades analizadas se muestran en los cuadros 8, 9 y 10 respectivamente.

Cuadro 8. Biomasa acumulada en la plantación de teca.

Año de establecimiento	Superficie (ha)	Biomasa (ton/ha)	Superficie (ha)/biomasa (ton/ha)
2011	217.6004	75.912	16,518.48
2012	401.3885	55.311	22,201.20
2013	198.2276	33.572	6,654.90
2016	23.8663	1.039	24.80
			TOTAL BIOMASA ACUMULADA
			45,399.38 (ton)

Cuadro 9. Carbono acumulado en la plantación de teca.

Año de establecimiento	Carbono (ton/árbol)	Superficie (ha)	Carbono (ton/ha)	Superficie (ha)/carbono (ton/ha)
2011	0.0491	217.6004	40.082	8,721.42
2012	0.0357	401.3885	29.204	11,720.54
2013	0.0221	198.2276	18.095	3,587.92
2016	0.0007	23.8663	0.537	12.89
				TOTAL CARBONO ALMACENADO
				24,042.77 (ton)

Cuadro 10. Dióxido de carbono acumulado en la plantación de teca.

Año de establecimiento	CO₂(ton/árbol)	Superficie (ha)	Dióxido de carbono (ton/ha)	Superficie (ha)/CO₂(ton/ha)
2011	0.1803	217.6004	147.100	32,009.02
2012	0.1313	401.3885	107.179	43,020.82
2013	0.0814	198.2276	66.410	13,164.29
2016	0.0024	23.8663	1.972	47.02
				TOTAL DIÓXIDO DE CARBONO ALMACENADO (ton)
				88,241.15

Las ecuaciones generadas para cuantificar el carbono y el dióxido de carbono acumulado a partir de los valores de los parámetros de los cuadros 6 y 7, quedan definidas como:

$$C_{acumulado}(t) = [(\beta_0 * (d * H)^{\beta_1}] * [D * FEB] * [(1 + R) * FC]$$

Dónde:

C acumulado= Carbono acumulado (ton).

d= Diámetro normal (cm).

H= Altura total (m).

D= Densidad (g/cm³)

FEB= Factor de expansión de biomasa

1+R= Relación biomasa radical/biomasa total

FC= Factor de conversión

$$CO_2_{acumulado}(t) = ((\beta_0 * (d * H)^{\beta_1} * D * FEB) * (1 + R) * FC * FCO_2)$$

Dónde:

C acumulado= Carbono acumulado (ton).

d= Diámetro normal (cm).

H= Altura total (m).

D= Densidad (g/cm³)

FEB= Factor de expansión de biomasa

1+R= Relación biomasa radical/biomasa total

FC= Factor de conversión

44/12= Fijación de CO₂

En los Anexos 1, 2, 3 y 4 se muestran las tablas de fijación de carbono para las cuatro edades analizadas y en Anexos 5, 6, 7 y 8 se muestran las tablas de fijación de dióxido de carbono para las cuatro edades analizadas.

7.7. TABLA DE PRODUCTIVIDAD PRELIMINAR

El ajuste del modelo de Schumacher de dos parámetros se efectuó a través del software Statistica®; una vez realizados los ajustes y obtenidas las ecuaciones de crecimiento para diámetro normal, altura total, área basal, volumen, carbono y dióxido de carbono, cada índice de sitio se determinó con la elaboración de las tablas de rendimiento, a partir de una densidad inicial de 816 árboles ha (distanciamiento de 3.50 x 3.50 m).

El sistema de curvas anamórficas de índice de sitio para cada edad (Figura 9, 10, 11) se elaboró mediante el empleo de la ecuación:

$$\ln(S) = \ln(Hd) + \beta_0 * ((E + 1))^{-1} - E0^{-1}$$

La cual se generó por el ajuste del modelo de Schumacher (1939) de dos parámetros en relación con los datos de altura y edad de los 120, 230 y 120 árboles dominantes de la plantación de *Tectona grandis* para el año 2011.

Se definieron cuatro clases de índice de sitio: bajo, medio, alto y excelente. En los cuadros 14, 15, 16 y 17 se presentan las tablas de rendimiento potencial para los índices de sitio 8, 11, 13 y 15 m (año de establecimiento 2011).

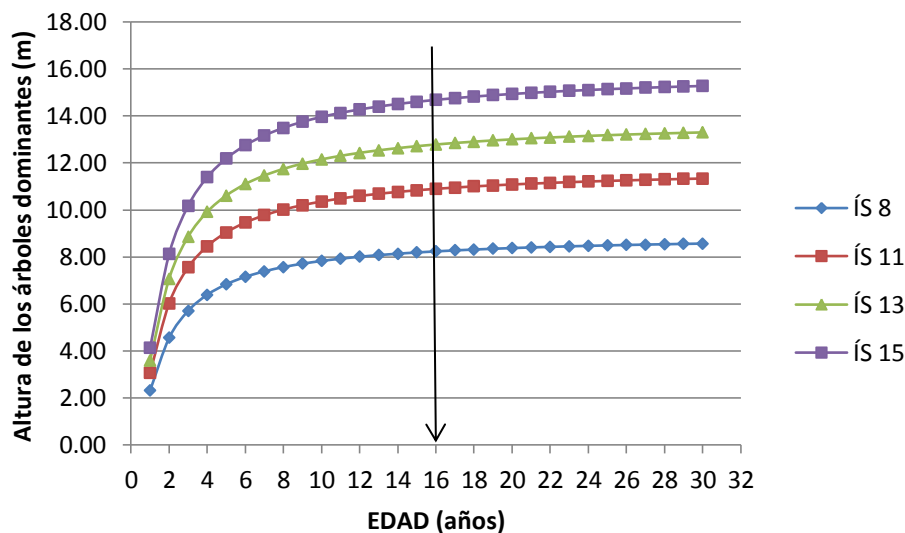


Figura 9. Sistema de curvas de índice de sitio para la plantación establecida en 2011 (Edad base 16 años).

Cuadro 11. Parámetros de los modelos de crecimiento y sus estadísticos de significancia. Año de establecimiento 2011.

Variable	Parámetro	Estimada	Error estándar	Valor de t	P-valor
Diámetro (cm)	a0	26.961323 1	0.3289706 4	81.956624 9	0.00
	a1	7.0131184 1	0.1094256 4	64.090268 2	0.00
Altura (m)	a0	1.3539657 4	0.0167101 2	81.026679 6	0.00
	a1	- 0.4835678 2	0.0082007 4	- 58.966389 7	0.00
Área basal (G) (m²/ha)	a0	60.232511 5	1.9329122 5	31.161534 1	0.00
	a1	16.574445 5	0.3426304 9	48.374111 4	0.00
Volumen (m³/ha)	a0	1.6483587 7	0.0679783 7	24.248283 2	0.00
	a1	29.896551 3	0.4771838 3	62.652067 2	0.00
Biomasa (ton/ha)	a0	1381.6472 9	56.979459 4	24.248164 2	0.00
	a1	29.896558 7	0.4771849 7	62.651928 6	0.00
C (ton/ha)	a0	729.53300 4	30.093515 7	24.242199 3	0.00
	a1	29.89693 2	0.4772082 2	62.649654 2	0.00
CO₂ (ton/ha)	a0	2677.4763 4	110.47570 4	24.235883 9	0.00
	a1	29.897323 3	0.4772366 1	62.646751 5	0.00

Cuadro 14. Productividad preliminar de Teca para índice de sitio 8 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.

Edad años	AD (m)	DN (cm)	G (m²/ha)	V (m³/ha)	Biomasa (ton/ha)	C (ton/ha)	CO₂ (ton/ha)
1	2.31	1.30	0.047	0.003	0.003	0.002	0.007
2	4.56	5.78	1.584	1.899	1.950	1.030	3.779
3	5.71	7.89	3.303	7.148	7.343	3.877	14.228
4	6.39	9.00	4.502	12.500	12.840	6.779	24.879
5	6.84	9.67	5.335	16.979	17.440	9.208	33.794
6	7.15	10.1 2	5.937	20.592	21.152	11.168	40.986
7	7.39	10.4 3	6.390	23.511	24.151	12.751	46.796
8	7.57	10.6 7	6.742	25.897	26.602	14.045	51.546
9	7.71	10.8 6	7.023	27.875	28.633	15.118	55.482
10	7.83	11.0 1	7.252	29.536	30.339	16.019	58.789
11	7.93	11.1 3	7.442	30.949	31.790	16.785	61.600
12	8.01	11.2 3	7.602	32.163	33.038	17.444	64.017
13	8.08	11.3 2	7.740	33.218	34.121	18.016	66.116
14	8.14	11.3 9	7.858	34.141	35.070	18.517	67.955
15	8.19	11.4 5	7.962	34.957	35.908	18.959	69.579
16	8.24	11.5 1	8.053	35.682	36.653	19.352	71.022
17	8.28	11.5 6	8.134	36.331	37.319	19.704	72.314
18	8.31	11.6 0	8.206	36.915	37.919	20.021	73.476
19	8.35	11.6 4	8.271	37.443	38.462	20.308	74.528

20	8.38	11.6 7	8.329	37.923	38.955	20.568	75.483
21	8.40	11.7 0	8.383	38.361	39.405	20.805	76.355
22	8.43	11.7 3	8.431	38.763	39.817	21.023	77.154

AD= Altura dominante (m); DN= Diámetro normal (cm); G= Área basal (m²/ha); V = Volumen total del fuste con corteza (m³/ha); Biomasa (ton/ha); C= Carbono (ton/ha); CO₂= Dióxido de carbono (ton/ha (m³)).

Cuadro 15. Productividad preliminar de Teca para índice de sitio 11 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.

Edad años	AD (m)	DN (cm)	G (m²/ha)	V (m³/ha)	Biomasa a (ton/ha)	C (ton/ha)	CO₂ (ton/ha)
1	3.06	2.73	0.269	0.077	0.080	0.042	0.154
2	6.03	8.42	3.850	9.427	9.683	5.112	18.762
3	7.55	10.65	6.710	25.678	26.37 7	13.927	51.110
4	8.45	11.76	8.481	39.174	40.23 9	21.246	77.972
5	9.05	12.42	9.642	49.377	50.72 0	26.780	98.281
6	9.46	12.85	10.454	57.129	58.68 3	30.984	113.712
7	9.77	13.16	11.051	63.151	64.86 8	34.250	125.698
8	10.01	13.38	11.508	67.938	69.78 5	36.847	135.226
9	10.20	13.56	11.868	71.823	73.77 7	38.954	142.961
10	10.36	13.70	12.159	75.035	77.07 6	40.696	149.354
11	10.49	13.81	12.400	77.732	79.84 6	42.159	154.722
12	10.59	13.91	12.601	80.027	82.20 3	43.403	159.289
13	10.69	13.99	12.773	82.002	84.23 3	44.475	163.221

14	10.77	14.06	12.921	83.720	85.99 7	45.406	166.641
15	10.84	14.11	13.049	85.228	87.54 6	46.224	169.642
16	10.90	14.17	13.162	86.561	88.91 5	46.947	172.295
17	10.95	14.21	13.262	87.748	90.13 4	47.591	174.658
18	11.00	14.25	13.350	88.812	91.22 7	48.168	176.776
19	11.04	14.29	13.430	89.771	92.21 2	48.688	178.684
20	11.08	14.32	13.502	90.639	93.10 4	49.159	180.413
21	11.12	14.35	13.567	91.429	93.91 6	49.588	181.986
22	11.15	14.38	13.626	92.151	94.65 8	49.979	183.424

AD= Altura dominante (m); DN= Diámetro normal (cm); G= Área basal (m²/ha); V = Volumen total del fuste con corteza (m³/ha); Biomasa (ton/ha), C= Carbono (ton/ha); CO₂= Dióxido de carbono (ton/ha).

Cuadro 16. Productividad preliminar de Teca para índice de sitio 13 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.

Edad años	AD (m)	DN (cm)	G (m²/ha)	V (m³/ha)	Bioma sa (ton/ha)	C (ton/ha)	CO₂ (ton/ha)
1	3.59	3.83	0.597	0.327	0.336	0.177	0.651
2	7.07	10.00	5.777	19.603	20.137	10.632	39.018
3	8.86	12.22	9.277	46.058	47.311	24.980	91.675
4	9.92	13.29	11.326	66.018	67.814	35.806	131.406
5	10.61	13.92	12.636	80.418	82.605	43.616	160.068
6	11.10	14.34	13.537	91.063	93.540	49.389	181.257
7	11.47	14.63	14.193	99.183	101.88 1	53.793	197.420
8	11.75	14.84	14.692	105.557	108.42	57.250	210.107

					8		
9	11.97	15.01	15.083	110.682	113.69 2	60.030	220.309
10	12.15	15.14	15.399	114.887	118.01 2	62.311	228.680
11	12.30	15.25	15.658	118.398	121.61 8	64.214	235.667
12	12.43	15.34	15.874	121.371	124.67 2	65.827	241.585
13	12.54	15.41	16.058	123.920	127.29 0	67.209	246.659
14	12.63	15.47	16.216	126.129	129.56 0	68.408	251.058
15	12.71	15.53	16.354	128.063	131.54 6	69.456	254.906
16	12.78	15.58	16.474	129.768	133.29 8	70.381	258.301
17	12.85	15.62	16.581	131.284	134.85 5	71.203	261.317
18	12.91	15.66	16.675	132.639	136.24 7	71.939	264.016
19	12.96	15.69	16.760	133.859	137.50 0	72.600	266.443
20	13.00	15.72	16.837	134.962	138.63 3	73.198	268.639
21	13.05	15.75	16.906	135.965	139.66 3	73.742	270.635
22	13.08	15.77	16.969	136.879	140.60 2	74.238	272.456

AD= Altura dominante (m); DN= Diámetro normal (cm); G= Área basal (m²/ha); V = Volumen total del fuste con corteza (m³/ha); Biomasa (ton/ha), C= Carbono (ton/ha); CO₂= Dióxido de carbono (ton/ha).

Cuadro 17. Productividad preliminar de Teca para índice de sitio 15 m, edad base de 16 años y 816 árboles/ha. Año de establecimiento 2011.

Edad años	AD (m)	DN (cm)	G (m²/ha)	V (m³/ha)	Bioma sa (ton/ha)	C (ton/ha)	CO₂ (ton/ha)
1	4.13	4.93	1.085	0.960	0.986	0.564	0.571
2	8.12	11.37	7.824	33.873	34.794	29.281	29.644
3	10.18	13.53	11.816	71.260	73.198	66.775	67.603
4	11.39	14.57	14.059	97.494	100.14 6	94.517	95.691
5	12.19	15.17	15.464	115.767	118.91 6	114.343	115.763
6	12.75	15.56	16.420	129.000	132.50 9	128.917	130.518
7	13.17	15.83	17.111	138.960	142.73 9	139.995	141.734
8	13.49	16.03	17.633	146.703	150.69 3	148.668	150.514
9	13.75	16.19	18.042	152.885	157.04 4	155.628	157.561
10	13.96	16.31	18.369	157.931	162.22 6	161.331	163.335
11	14.13	16.41	18.638	162.124	166.53 4	166.086	168.149
12	14.28	16.50	18.863	165.663	170.16 9	170.109	172.222
13	14.40	16.57	19.053	168.688	173.27 6	173.556	175.712
14	14.51	16.63	19.216	171.304	175.96 3	176.542	178.735
15	14.60	16.68	19.358	173.588	178.30 9	179.153	181.378
16	14.68	16.72	19.482	175.599	180.37 5	181.455	183.709
17	14.76	16.76	19.591	177.383	182.20 8	183.499	185.779
18	14.82	16.80	19.688	178.977	183.84	185.328	187.630

					5		
19	14.88	16.83	19.776	180.409	185.31 6	186.972	189.295
20	14.93	16.86	19.854	181.702	186.64 5	188.459	190.800
21	14.98	16.88	19.925	182.877	187.85 1	189.810	192.167
22	15.03	16.91	19.990	183.948	188.95 1	191.042	193.415

AD= Altura dominante (m); DN= Diámetro normal (cm); G= Área basal (m²/ha); V = Volumen total del fuste con corteza (m³/ha); Biomasa (ton/ha); C= Carbono (ton/ha); CO₂= Dióxido de carbono (ton/ha).

8. DISCUSIÓN

El volumen fustal a los seis años de establecida es de 73.90 m³/ha, este resultado es inferior a lo reportado por Villavicencio (2015), este autor determinó un volumen de 80.16 m³/ha y un área basal de 17.58 m²/ha, a los seis años de edad en Ecuador.

Densidad básica. Los ensayos se efectuaron con un contenido de humedad de 12%, con respecto a la densidad básica *Tectona grandis* mostró valor de 0.48 g/cm³, este resultado es inferior a lo reportado por Telles *et al.*, (2017) quienes determinaron una densidad básica de 0.59 g/cm³ en una plantación de 11 años de edad establecida en Nuevo Urecho, Michoacán y por Rodríguez *et al.*, (2014) quienes reportan un valor de 0.55 g/cm³ en plantaciones establecidas en Campeche.

Biomasa. Del análisis de contenido de biomasa en los árboles para las distintas edades de la plantación se observa que el fuste es el componente vegetal que mayor cantidad de biomasa almacena y las hojas son la estructura vegetal que menor biomasa almacena. A diferencia de Cubero (1999) en Costa Rica, que reporto el 53% de biomasa aérea y el resto en el fuste.

Factor de expansión de biomasa. El resultado del factor de expansión de biomasa 2.14 es superior a lo reportado por Orrala y Guiracocha (2007) quienes determinaron un FEB de 1.39. El resultado del FEB calculado en este estudio se encuentran dentro del rango de lo reportado para varias especies en bosques naturales y en plantaciones, por ejemplo Soliz (1998) en Bolivia encontró un FEB de 2.5.

Factor de conversión de biomasa a carbono. En el análisis de carbono, se determinó el factor de conversión de la biomasa a carbono en 0.48%. Este resultado se encuentra dentro del rango reportado para diferentes especies en otros estudios como lo encontrado por Yamallel *et al.*, (2012).

Fijación de carbono y bióxido de carbono. Los valores de los parámetros del modelo ajustado así como sus indicadores de bondad de ajuste y nivel de confiabilidad para la fijación de carbono y bióxido de carbono resultó con una R^2 de 0.9890 y 0.9889, respectivamente, alto grado de confiabilidad.

Los modelos explican valores porcentuales altos (98%) de la variabilidad total presente en la variable dependiente, y una alta significancia en cada uno de sus parámetros; por lo que se consideran apropiados para predecir con mayor precisión el carbono almacenado en función de las variables; volumen total de fuste (V_{cc}), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total ($1+R$), factor de conversión (FC), y el bióxido de carbono almacenado en función de las variables; volumen total de fuste (V_{cc}), densidad (D), factor de expansión de biomasa (FEB), relación biomasa radical-biomasa total ($1+R$), factor de conversión (FC) y fijación de CO_2 .

Los resultados de la cuantificación de biomasa, carbono y el bióxido de carbono almacenado para las cuatro edades analizadas mostraron que el carbono almacenado fue de 40.08 ton/ha, estos resultados son mayores a lo reportado por Villavicencio (2015) en una plantación de teca de 6 años de edad con una cantidad de carbono almacenado de 11.78 toneladas de C/ha; en un sistema agroforestal *Tectona grandis* con *Panicum maximum*, establecidos en el año 2000; Orrala y Guiracocha (2007) reportan que el sistema almacena 84.12 toneladas de C/ha; en Costa Rica en plantaciones de EcoBosques® de teca de diferentes edades se reportan 109.8 toneladas de C/ha y 403 toneladas de CO_2 /ha; Jaramillo y Correa (2015) reportan 17.15 toneladas de C/ha y 62.95 toneladas de CO_2 /ha.

9. CONCLUSIONES

La fijación de carbono fue de 40.082 ton/ha y de CO_2 147.100 ton/ha para el año 2016.

La ecuación generada a partir de datos de inventario y de laboratorio es una herramienta indispensable para la estimación de carbono y el CO_2 acumulado en la plantación de teca.

Estas ecuaciones matemáticas pueden aplicarse en otras plantaciones de *T. grandis* con condiciones de suelo y clima similares a las del estudio.

Es pertinente establecer un sistema de monitoreo hasta la edad de rotación de *T. grandis*.

Las plantaciones forestales forman parte de la gama de servicios ambientales ya que contribuyen con la mitigación del calentamiento global al absorber el CO₂ que es un gas de efecto invernadero.

10. REFERENCIAS

Andrasko K. (1990). Global warming and forests: an overview of current knowledge. *Unasylva* 4:3-11.

Ávila, G.; Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M. & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, Fijación de Carbono y Valoración de Servicios Ambientales en Sistemas Agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* Vol. 8 N° 30 2001. Avances en Investigación. 4 p.

Breymeyer A. I., B. Berg, S. T. Gower, D. Johnson. (1996). Carbon budget: temperate coniferous forests. In: *Global change*:

Brown S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Forest Ecology and Management* 116:363-372.

Capoor K., P. Ambrosi. (2008). State and trends of the carbon market 2008. World Bank Institute. Washington, D.C. 71 pp.

Castellanos, E., Quilo, A., & Mato, R. (2010). Metodología para la estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas agroforestales de Guatemala. Guatemala, Guatemala. 24 p.

Clutter, J.L.; Fortson, J.C.; Pienaar, L.V.; Brister, G.H.; Bailey, R.L. 1983. *Timber management: A quantitative approach*. Wiley & Sons.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2015). <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/>

Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT). (1972). *Madera-Selección y colección de muestras* (458, 459, 461, 462, 555, 464, 466). Buenos Aires, Argentina. s/p.

De Camino, M. & Morales, J. (2013). *Las Plantaciones de Teca en América Latina: Mitos y Realidades*. Turrialba, Costa Rica CATIE - FAO. 392 p.

Cubero Moya José Alberto, Rojas Pidra Susana Raquel, Universidad Nacional Facultad de Ciencias de la Tierra y El Mar. Escuela de Ciencias Ambientales. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L. f.) y pochote (*Bombacopsis*

quinata Jacq.) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, (Tesis de licenciatura) Costa Rica.

De Steiguer J. E., J. R. Brown, J. Thorpe. (2008). Contributing to the mitigation of climate change using rangeland management. *Rangelands* 30:7-11.

Diario Oficial de la Federación. Reglas de Operación del Programa Nacional Forestal 2016.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5422000&fecha=31/12/2015

FAO. (2001). Situación de los bosques en el mundo. Montes. Roma, Italia. 175 pp.

Fearnside P. M. (1999). Forests and global warming mitigation in Brazil: opportunities in the Brazilian forest sector for responses to global warming under the "clean development mechanism". *Biomass and Bioenergy* 16:171-189.

Fonseca, W. (2004). Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Costa Rica. Heredia, Heredia, Costa Rica. 121 p.

IPCC. (2008). Report of the 29th session of the IPCC. Geneva, 31 August - 4 September. pp.53.

Isaza D. J. F., D. Campos. (2007). Cambio climático. Glaciaciones y calentamiento global. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo. Bogotá, Colombia. 294 pp. Consultado en:
http://www.portalplanetasedna.com.ar/efecto_invernadero1.htm

Jaramillo, S. R. M., & Correa, G. H. M. 2015. Cuantificación de biomasa área total, carbono almacenado y CO₂ fijado en árboles teca (*Tectona grandis* linn f) en una parcela de muestreo rectangular de 500 m², en una hacienda en la Provincia El Oro. Ecuador.

López-Toache, V., Romero-Amado, J., Toache-Berttolini, G., & García-Sánchez, S. (2016). Bonos de carbono: financiarización del medioambiente en México. *Estudios Sociales*, 25(47), 190-214.

MacDicken K. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI).
<http://www.winrock.org/REEP/PUBSS.html> (14 de febrero de 2018).

Norverto, C. A. (2006). La fijación de CO₂ en plantaciones forestales y en productos de madera en Argentina. Buenos Aires, Argentina. Editorial GRAM.

Organización de Naciones Unidas (ONU), (2015). CMNUCC: El primer conjunto de medidas para combatir el cambio climático sitúan al mundo en el buen camino para el acuerdo de París. <http://www.un.org/climatechange/es/blog/2015/03/cmnucc-el-primer-conjunto-de-medidas-para-combatir-el-cambio-climatico-situan-al-mundo-en-el-buen-camino-para-el-acuerdo-de-paris/>

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2016). Boletín de la OMM sobre gases de efecto invernadero. Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2016. No 13. 30 de Octubre de 2017. Disponible en: http://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocomms/s3fspublic/ckeditor/files/GHG_Bulletin_13_ES_0.pdf?YBlfazyk.Xi_7L2Oc02Xh46Nt1g4TfOo

Perry D. A. (1994). Forest ecosystems. John Hopkins University Press. Baltimore, U.S.A. pp 187-193.

Raquel Orrala Augustin Bourne, Giniva Guiracocha Freire. 2007. Almacenamiento de carbono en dos sistemas silvopastoriles instalados en Quevedo Provincia de Los Ríos. (Tesis de grado) Ecuador.

Rodríguez A., R., J. F. Zamora N., J. A. Silva G., E. Salcedo P. y F. J. Fuentes T. 2014. Propiedades físico-mecánicas de madera de teca de plantaciones comerciales. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 5(24): 12-25.

Shaver G. R., J. D. Aber. (1996). Carbon and nutrient allocation in terrestrial ecosystems. In: Global change: effects on coniferous forests and grasslands. John Wiley. New York, NY, USA. pp. 183-198.

Soliz B. 1998. Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque subhúmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 113 p + anexos. Sprugel DG. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology 64(1): 209-210.

Telles Antonio, R., Nájera Luna, J. A., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., Jiménez Pérez, J., Gómez Cárdenas, M., & Muñoz Flores, H. J. 2017. Propiedades físico-mecánicas de la madera *Tectona grandis* L. f. de una

plantación comercial en el estado de Michoacán. Revista mexicana de ciencias forestales, 8(40), 37-56.

Torres J. M., S. A. Guevara. (2005). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. Gaceta ecológica 63:40-59.

Villavicencio, G. X. A. 2015. Estimación de carbono almacenado en biomasa aérea en plantación de Teca (*Tectona grandis* LF:), ubicada en la parroquia Huámbi, provincia de Morona Santiago (Tesis de grado). Loja, Ecuador.

Walker, W. (2011). Guía de Campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal. Massachusetts, USA. 49 p.

Weaver, P. L. (1993). *Tectona grandis* Lf Teak. Verbenaceae. Verbena family. USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry; 18 p.(SO-ITF-SM; 64).

Winrock International. (2014). Standard Operating procedures for Terrestrial carbón Measurement Field Manual. Disponible en: <http://www.leafasia.org/library/standard-operating-procedures-terrestrial-carbon-measurement-field-manual>

Winrock International. (2014). Winrock terrestrial carbon measurement sops. Sop destructive sampling of tres, saplings, palms, bamboo, and non-tree Woody vegetation. Disponible en: http://www.leafasia.org/sites/default/files/public/resources/Winrock_Terrestrial_Carbon_Field_SOP_Manual_July2014%20to%20print.pdf

Yerena, Y., Israel, J., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., & Alanís Rodríguez, E. 2012. Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. Revista mexicana de ciencias forestales, 3(13), 49-56.

11. ANEXOS

ANEXO 1. Tabla de fijación de carbono (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2011).

Altura (m)																
Diámetro (cm)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
6	9.6	12.3	15.3	18.4	21.8	25.4	29.2	33.2	37.4	41.7	46.2	50.9	55.8	60.8	66.0	71.4
7	12.3	15.8	19.5	23.6	27.9	32.5	37.4	42.4	47.8	53.4	59.1	65.2	71.4	77.8	84.5	91.3
8	15.3	19.5	24.2	29.2	34.5	40.2	46.2	52.5	59.1	66.0	73.2	80.7	88.4	96.3	104.6	113.1
9	18.4	23.6	29.2	35.2	41.7	48.6	55.8	63.4	71.4	79.7	88.4	97.4	106.7	116.3	126.2	136.5
10	21.8	27.9	34.5	41.7	49.3	57.5	66.0	75.0	84.5	94.3	104.6	115.2	126.2	137.6	149.4	161.5
11	25.4	32.5	40.2	48.6	57.5	66.9	76.9	87.4	98.4	109.8	121.8	134.2	147.0	160.3	173.9	188.0
12	29.2	37.4	46.2	55.8	66.0	76.9	88.4	100.4	113.1	126.2	139.9	154.2	168.9	184.2	199.9	216.1
13	33.2	42.4	52.5	63.4	75.0	87.4	100.4	114.1	128.5	143.4	159.0	175.2	192.0	209.3	227.2	245.7
14	37.4	47.8	59.1	71.4	84.5	98.4	113.1	128.5	144.6	161.5	179.0	197.2	216.1	235.6	255.7	276.4
15	41.7	53.4	66.0	79.7	94.3	109.8	126.2	143.4	161.5	180.3	199.9	220.2	241.3	263.0	285.5	308.7
16	46.2	59.1	73.2	88.4	104.6	121.8	139.9	159.0	179.0	199.9	221.6	244.1	267.5	291.6	316.5	342.2
17	50.9	65.2	80.7	97.4	115.2	134.2	154.2	175.2	197.2	220.2	244.1	269.0	294.7	321.3	348.7	377.0
18	55.8	71.4	88.4	106.7	126.2	147.0	168.9	192.0	216.1	241.3	267.5	294.7	322.9	352.0	382.1	413.1
19	60.8	77.8	96.3	116.3	137.6	160.3	184.2	209.3	235.6	263.0	291.6	321.3	352.0	383.8	416.5	450.3
20	66.0	84.5	104.6	126.2	149.4	173.9	199.9	227.2	255.7	285.5	316.5	348.7	382.1	416.5	452.1	488.8
21	71.4	91.3	113.1	136.5	161.5	188.0	216.1	245.6	276.4	308.7	342.2	377.0	413.0	450.3	488.8	528.0
22	76.9	98.4	121.8	147.0	173.9	202.5	232.8	264.5	297.8	332.5	368.6	406.1	444.9	485.0	526.5	569.0
23	82.6	105.6	130.7	157.8	186.7	217.5	249.9	284.0	319.7	356.9	395.7	436.0	477.7	520.7	565.2	611.1
24	88.4	113.1	139.9	168.9	199.9	232.8	267.5	304.0	342.2	382.1	423.6	466.6	511.3	557.4	605.0	654.0

ANEXO 2. Tabla de fijación de carbono (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2012).

Diámetro (cm)	Altura (m)																		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
4	2.9	4.2	5.5	7.0	8.7	10.4	12.3	14.2	16.3	18.5	20.8	23.1	25.6	28.1	30.8	33.5	36.3	39.1	42.0
5	4.2	5.9	7.8	10.0	12.3	14.8	17.4	20.2	23.1	26.2	29.4	32.8	36.3	39.9	43.6	47.4	51.4	55.5	59.7
6	5.5	7.8	10.4	13.2	16.3	19.6	23.1	26.8	30.8	34.9	39.1	43.6	48.2	53.0	58.0	63.1	68.3	73.8	79.6
7	7.0	10.0	13.2	16.9	20.8	25.0	29.4	34.2	39.1	44.4	49.8	55.5	61.4	67.5	73.8	80.3	87.0	93.9	100.9
8	8.7	12.3	16.3	20.8	25.6	30.8	36.3	42.1	48.2	54.6	61.4	68.3	75.6	83.1	90.9	98.9	107.2	115.7	124.4
9	10.4	14.8	19.6	25.0	30.8	37.0	43.6	50.6	58.0	65.7	73.8	82.2	90.9	99.9	109.3	118.9	128.8	139.0	149.5
10	12.3	17.4	23.1	29.4	36.3	43.6	51.4	59.7	68.3	77.5	87.0	96.9	107.2	117.8	128.8	140.2	151.9	163.9	176.3
11	14.2	20.2	26.8	34.2	42.1	50.6	59.7	69.2	79.3	89.9	100.9	112.4	124.4	136.7	149.5	162.7	176.3	190.3	204.6
12	16.3	23.1	30.8	39.1	48.2	58.0	68.3	79.3	90.9	103.0	115.7	128.8	142.5	156.7	171.3	186.4	202.0	218.0	234.4
13	18.5	26.2	34.9	44.4	54.6	65.7	77.5	89.9	103.0	116.7	131.1	146.0	161.5	177.6	194.2	211.3	228.9	247.1	265.7
14	20.8	29.4	39.1	49.8	61.4	73.8	87.0	100.9	115.7	131.1	147.2	163.9	181.3	199.4	218.0	237.2	257.0	277.4	298.3
15	23.1	32.8	43.6	55.5	68.3	82.2	96.9	112.4	128.8	146.0	163.9	182.6	202.0	222.1	242.8	264.2	286.3	309.0	332.3
16	25.6	36.3	48.2	61.4	75.6	90.9	107.2	124.4	142.5	161.5	181.3	202.0	223.4	245.6	268.6	292.3	316.7	341.8	367.6
17	28.1	39.9	53.0	67.5	83.1	99.9	117.8	136.7	156.7	177.6	199.4	222.1	245.6	270.1	295.3	321.4	348.2	375.8	404.1
18	30.8	43.6	58.0	73.8	90.9	109.3	128.8	149.5	171.3	194.2	218.0	242.8	268.6	295.3	322.9	351.4	380.7	410.9	441.9
19	33.5	47.4	63.1	80.3	98.9	118.9	140.2	162.7	186.4	211.3	237.2	264.2	292.3	321.4	351.4	382.4	414.3	447.2	480.9
20	36.3	51.4	68.3	87.0	107.2	128.8	151.9	176.3	202.0	228.9	257.0	286.3	316.7	348.2	380.7	414.3	448.9	484.5	521.0
21	39.1	55.5	73.8	93.9	115.7	139.0	163.9	190.3	218.0	247.1	277.4	309.0	341.8	375.8	410.9	447.2	484.5	522.9	562.3
22	42.1	59.7	79.3	100.9	124.4	149.5	176.3	204.6	234.4	265.7	298.3	332.3	367.6	404.1	441.9	480.9	521.0	562.3	604.6
23	45.1	63.9	85.0	108.2	133.3	160.3	189.0	219.4	251.3	284.8	319.8	356.2	394.0	433.2	473.7	515.5	558.5	602.8	648.4
24	48.2	68.3	90.9	115.7	142.5	171.3	202.0	234.4	268.6	304.4	341.8	380.7	421.2	463.0	506.3	551.0	597.0	644.3	692.9

ANEXO 3. Tabla de fijación de carbono (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2013).

Diámetro (cm)	Altura (m)															
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	1.1	1.6	2.1	2.7	3.3	3.9	4.6	5.3	6.1	6.9	7.7	8.5	9.4	10.3	11.3	12.2
3	2.1	3.0	3.9	5.0	6.1	7.3	8.5	9.9	11.3	12.7	14.2	15.8	17.4	19.1	20.9	22.7
4	3.3	4.6	6.1	7.7	9.4	11.3	13.2	15.3	17.4	19.7	22.1	24.5	27.0	29.6	32.3	35.1
5	4.6	6.5	8.5	10.8	13.2	15.8	18.6	21.5	24.5	27.7	31.0	34.4	37.9	41.6	45.4	49.3
6	6.1	8.5	11.3	14.2	17.4	20.9	24.5	28.3	32.3	36.5	40.9	45.4	50.1	54.9	59.9	65.0
7	7.7	10.8	14.2	18.0	22.1	26.4	31.0	35.8	40.9	46.1	51.7	57.4	63.3	69.4	75.7	82.2
8	9.4	13.2	17.4	22.1	27.0	32.3	37.9	43.9	50.1	56.5	63.3	70.3	77.5	85.0	92.8	100.7
9	11.3	15.8	20.9	26.4	32.3	38.7	45.4	52.5	59.9	67.6	75.7	84.1	92.8	101.7	111.0	120.5
10	13.2	18.6	24.5	31.0	37.9	45.4	53.3	61.6	70.3	79.4	88.9	98.7	108.9	119.4	130.2	141.4
11	15.3	21.5	28.3	35.8	43.9	52.5	61.6	71.2	81.3	91.8	102.7	114.1	125.9	138.0	150.6	163.5
12	17.4	24.5	32.3	40.9	50.1	59.9	70.3	81.3	92.8	104.8	117.3	130.2	143.7	157.6	171.9	186.6
13	19.7	27.7	36.5	46.1	56.5	67.6	79.4	91.8	104.8	118.3	132.4	147.1	162.3	178.0	194.1	210.8
14	22.1	31.0	40.9	51.7	63.3	75.7	88.9	102.7	117.3	132.4	148.3	164.7	181.6	199.2	217.3	235.9
15	24.5	34.4	45.4	57.4	70.3	84.1	98.7	114.1	130.2	147.1	164.7	182.9	201.7	221.2	241.3	262.0
16	27.0	37.9	50.1	63.3	77.5	92.8	108.9	125.9	143.7	162.3	181.6	201.7	222.6	244.1	266.2	289.0
17	29.6	41.6	54.9	69.4	85.0	101.7	119.4	138.0	157.6	178.0	199.2	221.2	244.1	267.6	291.9	317.0
18	32.3	45.4	59.9	75.7	92.8	111.0	130.2	150.6	171.9	194.1	217.3	241.3	266.2	291.9	318.5	345.8
19	35.1	49.3	65.0	82.2	100.7	120.5	141.4	163.5	186.6	210.8	235.9	262.0	289.0	317.0	345.8	375.4
20	37.9	53.3	70.3	88.9	108.9	130.2	152.9	176.7	201.7	227.9	255.1	283.3	312.5	342.7	373.8	405.9
21	40.9	57.4	75.7	95.7	117.3	140.3	164.7	190.3	217.3	245.4	274.7	305.1	336.6	369.1	402.6	437.1
22	43.9	61.6	81.3	102.7	125.9	150.6	176.7	204.3	233.2	263.4	294.8	327.5	361.2	396.1	432.1	469.2
23	46.9	65.9	86.9	109.9	134.7	161.1	189.1	218.6	249.5	281.8	315.5	350.4	386.5	423.9	462.4	502.0
24	50.1	70.3	92.8	117.3	143.7	171.9	201.7	233.2	266.2	300.7	336.6	373.8	412.4	452.2	493.3	535.6

ANEXO 4. Tabla de fijación de carbono (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2016).

Altura(m)																							
Diám etro (cm)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
2	0.8	1.2	1.6	2.1	2.7	3.3	3.9	4.6	5.2	6.0	6.7	7.5	8.3	9.2	10. 0	10. 9	11. 8	12. 8	13. 7	14. 7	15. 7	16. 7	
3	1.4	2.1	3.0	3.9	4.9	6.0	7.1	8.3	9.6	10. 9	12. 3	13. 7	15. 2	16. 7	18. 3	19. 9	21. 6	23. 3	25. 1	26. 9	28. 7	30. 6	
4	2.1	3.3	4.6	6.0	7.5	9.2	10. 9	12. 8	14. 7	16. 7	18. 9	21. 1	23. 3	25. 7	28. 1	30. 6	33. 2	35. 8	38. 5	41. 2	44. 1	46. 9	
5	3.0	4.6	6.3	8.3	10. 5	12. 8	15. 2	17. 8	20. 5	23. 3	26. 3	29. 3	32. 5	35. 8	39. 2	42. 6	46. 2	49. 9	53. 6	57. 5	61. 4	65. 4	
6	3.9	6.0	8.3	10. 9	13. 7	16. 7	19. 9	23. 3	26. 9	30. 6	34. 5	38. 5	42. 6	46. 9	51. 4	55. 9	60. 6	65. 4	70. 4	75. 4	80. 5	85. 8	
7	4.9	7.5	10.5	13. 7	17. 3	21. 1	25. 1	29. 3	33. 8	38. 5	43. 4	48. 4	53. 6	59. 0	64. 6	70. 4	76. 2	82. 3	88. 5	94. 8	10 1.3	10 7.9	
8	6.0	9.2	12.8	16. 7	21. 1	25. 7	30. 6	35. 8	41. 2	46. 9	52. 9	59. 0	65. 4	72. 0	78. 8	85. 8	93. 0	10 0.4	10 7.9	11 5.7	12 3.6	13 1.7	
9	7.1	10. 9	15.2	19. 9	25. 1	30. 6	36. 5	42. 6	49. 1	55. 9	63. 0	70. 4	78. 0	85. 8	93. 9	10 2.3	11 0.8	11 9.6	12 8.6	13 7.8	14 7.2	15 6.9	
10	8.3	12. 8	17.8	23. 3	29. 3	35. 8	42. 6	49. 9	57. 5	65. 4	73. 7	82. 3	91. 2	10 0.4	10 9.9	11 9.6	12 9.6	13 9.9	15 0.4	16 1.2	17 2.2	18 3.5	
11	9.6	14. 7	20.5	26. 9	33. 8	41. 2	49. 1	57. 5	66. 2	75. 4	84. 9	94. 8	10 5.1	11 5.7	12 6.6	13 7.8	14 9.4	16 1.2	17 3.4	18 5.8	19 8.5	21 1.5	
12	10.9	16. 7	23.3	30. 6	38. 5	46. 9	55. 9	65. 4	75. 4	85. 8	96. 7	10 7.9	11 9.6	13 1.7	14 4.1	15 6.9	17 0.0	18 3.5	19 7.3	21 1.5	22 5.9	24 0.7	

13	12.3	18.9	26.3	34.5	43.4	52.9	63.0	73.7	84.9	96.7	108.9	121.6	134.7	148.3	162.3	176.7	191.5	206.7	222.3	238.2	254.5	271.1
14	13.7	21.1	29.3	38.5	48.4	59.0	70.4	82.3	94.8	107.9	121.6	135.8	150.4	165.6	181.2	197.3	213.8	230.8	248.2	266.0	284.1	302.7
15	15.2	23.3	32.5	42.6	53.6	65.4	78.0	91.2	105.1	119.6	134.7	150.4	166.7	183.5	200.8	218.6	236.7	255.0	273.5	292.4	311.5	330.7
16	16.7	25.7	35.8	46.9	59.0	72.0	85.8	100.4	115.7	131.7	148.3	165.6	183.5	202.0	221.1	240.7	260.8	281.5	302.7	324.4	346.6	369.2
17	18.3	28.1	39.2	51.4	64.6	78.8	93.9	109.9	126.6	144.1	162.3	181.2	200.8	221.1	242.0	263.4	285.5	308.1	331.3	355.0	379.3	404.1
18	19.9	30.6	42.6	55.9	70.4	85.8	102.3	119.6	137.8	156.9	176.7	197.3	218.6	240.7	263.4	286.8	310.8	335.4	360.7	386.5	412.8	439.5
19	21.6	33.2	46.2	60.6	76.2	93.0	111.0	129.6	149.4	170.0	191.5	213.8	236.7	260.8	285.5	310.8	336.8	363.5	390.9	418.9	447.6	476.8
20	23.3	35.8	49.9	65.4	82.3	100.4	119.6	139.9	161.2	183.5	206.7	230.8	255.0	280.8	307.1	333.8	361.0	388.7	416.9	445.6	474.8	504.5
21	25.1	38.5	53.6	70.4	88.5	107.9	128.6	150.4	173.4	197.3	222.0	247.3	273.1	300.8	329.1	358.0	387.5	417.5	448.0	479.0	510.5	542.5
22	26.9	41.2	57.5	75.4	94.8	115.7	137.8	161.2	185.8	211.7	238.3	265.6	293.4	322.0	351.1	380.8	411.0	441.5	472.5	504.0	536.0	568.5
23	28.7	44.1	61.4	80.5	101.3	122.6	144.2	167.0	190.8	215.7	241.6	268.3	295.8	324.0	352.8	382.0	411.5	441.5	472.0	503.0	534.5	566.5
24	30.6	46.9	65.4	85.8	107.9	130.4	153.4	176.9	200.8	225.7	251.6	278.3	305.8	334.0	362.8	392.0	421.5	451.5	482.0	513.0	544.5	576.5

ANEXO 5. Tabla de fijación de CO₂ (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2011).

Diámetro (cm)	Altura(m)																			
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
6	35.4	45.3	56.1	67.7	80.1	93.2	107.2	121.8	137.1	153.1	169.7	186.9	204.8	223.3	242.4	262.0	282.2	303.0	324.3	346.6
7	45.3	57.9	71.7	86.6	102.4	119.3	137.1	155.8	175.4	195.8	217.1	239.1	262.0	285.6	310.0	335.2	361.0	387.6	414.9	443.3
8	56.1	71.7	88.8	107.2	126.8	147.7	169.7	192.8	217.1	242.4	268.7	296.0	324.3	353.6	383.8	414.9	446.9	479.8	513.6	548.8
9	67.7	86.6	107.2	129.3	153.1	177.2	202.4	232.8	262.0	292.5	324.3	357.3	391.5	426.8	463.2	500.8	539.4	579.2	619.9	666.2
10	80.1	102.4	126.8	153.1	181.1	210.9	242.4	275.4	310.0	346.6	383.8	422.8	463.2	505.0	548.2	592.6	638.4	685.3	733.6	783.3
11	93.2	119.3	147.7	177.2	210.9	242.4	282.8	320.7	361.0	403.1	446.9	492.4	539.4	588.1	638.4	690.1	743.4	798.1	854.2	911.2
12	107.2	137.1	169.7	202.4	242.4	282.8	324.3	368.6	414.9	463.2	513.6	565.8	619.9	675.8	733.6	793.2	854.2	917.1	981.6	1048.8
13	121.8	153.1	186.9	223.3	262.0	302.4	346.6	418.8	471.5	526.4	583.6	643.0	704.5	768.0	833.6	901.2	970.8	1042.2	1115.6	1191.9
14	137.1	175.4	217.1	262.0	310.0	361.0	414.9	471.5	530.8	592.6	657.0	723.8	793.0	864.6	938.4	1014.5	1092.8	1173.2	1255.8	1340.4
15	153.1	195.8	242.4	292.5	346.6	403.1	463.2	526.4	592.6	661.7	733.8	808.2	885.5	965.4	1047.8	1133.2	1222.0	1313.6	1408.2	1505.9
16	169.7	217.1	268.7	324.3	383.8	446.9	513.6	583.8	657.0	733.8	813.2	896.6	981.0	1070.2	1166.6	1255.8	1355.2	1455.6	1558.2	1663.9
17	186.9	239.1	296.0	357.3	422.8	492.4	565.8	643.2	723.8	808.2	896.6	987.0	1088.5	1177.7	1277.2	1388.0	1499.2	1600.6	1711.2	1823.9

	6.9	9.1	6.0	7.3	2.8	2.4	5.8	.0	.8	.2	.0	.1	1.5	9.1	9.8	3.5	0.3	0.0	2.6	28
18	20 4.8	26 2.0	32 4.3	39 1.5	46 3.2	53 9.4	61 9.9	704 .5	793 .0	885 .5	981 .6	108 1.5	118 4.9	129 1.8	140 2.2	151 5.8	163 2.8	175 3.0	187 6.3	20 03
19	22 3.3	28 5.6	35 3.6	42 6.8	50 5.0	58 8.1	67 5.8	768 .0	864 .6	965 .4	107 0.2	117 9.1	129 1.8	140 8.4	152 8.7	165 2.6	178 0.1	191 1.1	204 5.6	21 83
20	24 2.4	31 0.0	38 3.8	46 3.2	54 8.2	63 8.4	73 3.6	833 .6	938 .4	104 7.8	116 1.6	127 9.8	140 2.2	152 8.7	165 9.2	179 3.7	193 2.2	207 4.4	222 0.3	23 70
21	26 2.0	33 5.2	41 4.9	50 0.8	59 2.6	69 0.1	79 3.0	901 .2	101 4.5	113 2.8	125 5.8	138 3.5	151 5.8	165 2.6	179 3.7	193 9.2	208 8.8	224 2.6	240 0.4	25 62
22	28 2.2	36 1.0	44 6.9	53 9.4	63 8.4	74 3.4	85 4.2	970 .8	109 2.8	122 0.2	135 2.7	149 0.3	163 2.8	178 0.1	193 2.2	208 8.8	225 0.0	241 5.6	258 5.6	27 60
23	30 3.0	38 7.6	47 9.8	57 9.2	68 5.3	79 8.1	91 7.1	104 2.2	117 3.2	131 0.0	145 2.3	160 0.0	175 3.0	191 1.1	207 4.4	224 2.6	241 5.6	259 3.4	277 5.9	29 63
24	32 4.3	41 4.9	51 3.6	61 9.9	73 3.6	85 4.2	98 1.6	111 5.6	125 5.8	140 2.2	155 4.5	171 2.6	187 6.3	204 5.6	222 0.3	240 0.4	258 5.6	277 5.9	297 1.2	31 71
25	34 6	44 3	54 8	66 2	78 3	91 2	10 48	119 1	134 0	149 7	165 9	182 8	200 3	218 3	237 0	256 2	276 0	296 3	317 1	33 85

ANEXO 6. Tabla de fijación de CO₂ (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2012).

Altura (m)																						
Díametro	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

(cm)																						
4	10 .7	15 .2	20 .3	25 .8	31 .8	38 .2	45 .0	52 .3	59. 9	67. 9	76. 2	84. 9	93. 9	10 3.2	11 2.9	12 2.8	13 3.1	14 3.6	15 4.5	16 5.6	17 7.0	18 8.6
5	15 .2	21 .6	28 .7	36 .5	45 .0	54 .1	63 .8	74 .1	84. 9	96. 2	10 8.0	12 0.3	13 3.1	14 6.3	16 0.0	17 4.1	18 8.6	20 3.6	21 8.9	23 4.7	25 0.8	26 7.4
6	20 .3	28 .7	38 .2	48 .6	59 .9	72 .0	84 .9	98 .5	11 2.9	12 7.9	14 3.6	16 0.0	17 7.0	19 4.6	21 2.7	23 1.5	25 0.8	27 0.7	29 1.1	31 2.1	33 3.6	35 5.5
7	25 .8	36 .5	48 .6	61 .8	76 .2	91 .6	10 8. 0	12 5. 4	14 3.6	16 2.8	18 2.8	20 3.6	22 5.2	24 7.6	27 0.7	29 4.6	31 9.2	34 4.5	37 0.5	39 7.1	42 4.5	45 2.4
8	31 .8	45 .0	59 .9	76 .2	93 .9	11 2. 9	13 3. 1	15 4. 5	17 7.0	20 0.6	22 5.2	25 0.8	27 7.5	30 5.1	33 3.6	36 3.0	39 3.3	42 4.5	45 6.5	48 9.3	52 3.0	55 7.5
9	38 .2	54 .1	72 .0	91 .6	11 2. 9	13 5. 7	16 0. 0	18 5. 7	21 2.7	24 1.1	27 0.7	30 1.6	33 3.6	36 6.7	40 1.0	43 6.4	47 2.8	51 0.3	54 8.8	58 8.3	62 8.7	67 0.2
10	45 .0	63 .8	84 .9	10 8. 0	13 3. 1	16 0. 0	18 8. 6	21 8. 9	25 0.8	28 4.3	31 9.2	35 5.5	39 3.3	43 2.4	47 2.8	51 4.5	55 7.5	60 1.6	64 7.0	69 3.6	74 1.3	79 0.2
11	52 .3	74 .1	98 .5	12 5. 4	15 4. 5	18 5. 7	21 8. 9	25 4. 1	29 1.1	33 0.0	37 0.5	41 2.7	45 6.5	50 1.9	54 8.8	59 7.2	64 7.0	69 8.3	75 1.0	80 5.0	86 0.4	91 7.1
12	59 .9	84 .9	11 2. 9	14 3. 6	17 7. 0	21 2. 7	25 0. 8	29 1. 1	33 3.6	37 8.0	42 4.5	47 2.8	52 3.0	57 5.0	62 8.7	68 4.2	74 1.3	80 0.1	86 0.4	92 2.3	98 5.8	10 50. 8
13	67 .9	96 .2	12 7.	16 2.	20 0.	24 1.	28 4.	33 0.	37 8.0	42 8.4	48 1.0	53 5.8	59 2.7	65 1.6	71 2.5	77 5.4	84 0.1	90 6.7	97 5.1	10 45.	11 17.	11 90.

			9	8	6	1	3	0												3	2	8
14	76 .2	10 8. 0	14 3. 6	18 2. 8	22 5. 2	27 0. 7	31 9. 2	37 0. 5	42 4.5	48 1.0	54 0.1	60 1.6	66 5.5	73 1.7	80 0.1	87 0.6	94 3.3	10 18. 1	10 94. 9	11 73. 7	12 54. 4	13 37. 1
15	84 .9	12 0. 3	16 0. 0	20 3. 6	25 0. 8	30 1. 6	35 5. 5	41 2. 7	47 2.8	53 5.8	60 1.6	67 0.2	74 1.3	81 5.0	89 1.2	96 9.8	10 50. 8	11 34. 0	12 19. 6	13 07. 4	13 97. 3	14 89. 4
16	93 .9	13 3. 1	17 7. 0	22 5. 2	27 7. 5	33 3. 6	39 3. 3	45 6. 5	52 3.0	59 2.7	66 5.5	74 1.3	82 0.0	90 1.5	98 5.8	10 72. 7	11 62. 3	12 54. 4	13 49. 1	14 46. 1	15 45. 6	16 47. 5
17	10 3. 2	14 6. 3	19 4. 6	24 7. 6	30 5. 1	36 6. 7	43 2. 4	50 1. 9	57 5.0	65 1.6	73 1.7	81 5.0	90 1.5	99 1.2	10 83. 8	11 79. 4	12 77. 9	13 79. 1	14 83. 2	15 89. 9	16 99. 3	18 11. 3
18	11 2. 9	16 0. 0	21 2. 7	27 0. 7	33 3. 6	40 1. 0	47 2. 8	54 8. 8	62 8.7	71 2.5	80 0.1	89 1.2	98 5.8	10 83. 8	11 85. 1	12 89. 6	13 97. 3	15 08. 1	16 21. 8	17 38. 5	18 58. 1	19 80. 6
19	12 2. 8	17 4. 1	23 1. 5	29 4. 6	36 3. 0	43 6. 4	51 4. 5	59 7. 2	68 4.2	77 5.4	87 0.6	96 9.8	10 72. 7	11 79. 4	12 89. 6	14 03. 4	15 20. 5	16 41. 1	17 64. 9	18 91. 9	20 22. 0	21 55. 3
20	13 3. 1	18 8. 6	25 0. 8	31 9. 2	39 3. 3	47 2. 8	55 7. 5	64 7. 0	74 1.3	84 0.1	94 3.3	10 50. 8	11 62. 3	12 77. 9	13 97. 3	15 20. 5	16 47. 5	17 78. 1	19 12. 2	20 49. 8	21 90. 8	23 35. 2
21	14 3. 6	20 3. 6	27 0. 7	34 4. 5	42 4. 5	51 0. 3	60 1. 6	69 8. 3	80 0.1	90 6.7	10 18. 1	11 34. 0	12 54. 4	13 79. 1	15 08. 1	16 41. 1	17 78. 1	19 19. 0	20 63. 8	22 12. 3	23 64. 5	25 20. 3
22	15 4.	21 8.	29 1.	37 0.	45 6.	54 8.	64 7.	75 1.	86 0.4	97 5.1	10 94.	12 19.	13 49.	14 83.	16 21.	17 64.	19 12.	20 63.	22 19.	23 79.	25 42.	27 10.

	5	9	1	5	5	8	0	0			9	6	1	2	8	9	2	8	4	2	9	4
23	16 5. 6	23 4. 7	31 2. 1	39 7. 1	48 9. 3	58 8. 3	69 3. 6	80 5. 0	92 2.3	10 45. 3	11 73. 7	13 07. 4	14 46. 1	15 89. 9	17 38. 5	18 91. 9	20 49. 8	22 12. 3	23 79. 2	25 50. 4	27 25. 8	29 05. 5
24	17 7. 0	25 0. 8	33 3. 6	42 4. 5	52 3. 0	62 8. 7	74 1. 3	86 0. 4	98 5.8	11 17. 2	12 54. 4	13 97. 3	15 45. 6	16 99. 3	18 58. 1	20 22. 0	21 90. 8	23 64. 5	25 42. 9	27 25. 8	29 13. 4	31 05. 4
25	18 8. 6	26 7. 4	35 5. 5	45 2. 4	55 7. 5	67 0. 2	79 0. 2	91 7. 1	10 50. 8	11 90. 8	13 37. 1	14 89. 4	16 47. 5	18 11. 3	19 80. 6	21 55. 3	23 35. 2	25 20. 3	27 10. 4	29 05. 5	31 05. 4	33 10. 0

ANEXO 7. Tabla de fijación de CO₂ (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2013).

Diámetro (cm)	Altura (m)															
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
2	4.2	5.9	7.8	9.8	12.0	14.4	16.9	19.5	22.3	25.2	28.2	31.3	34.5	37.9	41.3	
3	7.8	10.9	14.4	18.2	22.3	26.7	31.3	36.2	41.3	46.7	52.2	58.0	64.0	70.2	76.6	
4	12.0	16.9	22.3	28.2	34.5	41.3	48.5	56.1	64.0	72.3	80.9	89.9	99.2	108.7	118.6	
5	16.9	23.7	31.3	39.6	48.5	58.0	68.1	78.7	89.9	101.5	113.6	126.2	139.2	152.7	166.5	
6	22.3	31.3	41.3	52.2	64.0	76.6	89.9	103.9	118.6	134.0	149.9	166.5	183.7	201.5	219.8	
7	28.2	39.6	52.2	66.0	80.9	96.8	113.6	131.4	149.9	169.4	189.6	210.5	232.3	254.7	277.8	
8	34.5	48.5	64.0	80.9	99.2	118.6	139.2	160.9	183.7	207.5	232.3	258.0	284.6	312.1	340.4	
9	41.3	58.0	76.6	96.8	118.6	141.9	166.5	192.5	219.8	248.2	277.8	308.6	340.4	373.3	407.2	
10	48.5	68.1	89.9	113.6	139.2	166.5	195.5	226.0	258.0	291.4	326.1	362.2	399.6	438.2	478.0	

11	56.1	78.7	103.9	131.4	160.9	192.5	226.0	261.2	298.2	336.8	377.0	418.7	461.9	506.5	552.6
12	64.0	89.9	118.6	149.9	183.7	219.8	258.0	298.2	340.4	384.5	430.4	478.0	527.3	578.2	630.8
13	72.3	101.5	134.0	169.4	207.5	248.2	291.4	336.8	384.5	434.3	486.1	539.9	595.6	653.1	712.4
14	80.9	113.6	149.9	189.6	232.3	277.8	326.1	377.0	430.4	486.1	544.1	604.3	666.6	731.0	797.4
15	89.9	126.2	166.5	210.5	258.0	308.6	362.2	418.7	478.0	539.9	604.3	671.2	740.4	811.9	885.7
16	99.2	139.2	183.7	232.3	284.6	340.4	399.6	461.9	527.3	595.6	666.6	740.4	816.8	895.7	977.0
17	108.7	152.7	201.5	254.7	312.1	373.3	438.2	506.5	578.2	653.1	731.0	811.9	895.7	982.2	1071.4
18	118.6	166.5	219.8	277.8	340.4	407.2	478.0	552.6	630.8	712.4	797.4	885.7	977.0	1071.4	1168.7
19	128.8	180.8	238.6	301.7	369.6	442.1	519.0	599.9	684.8	773.5	865.8	961.6	1060.8	1163.2	1268.9
20	139.2	195.5	258.0	326.1	399.6	478.0	561.1	648.6	740.4	836.3	936.0	1039.6	1146.9	1257.6	1371.9
21	149.9	210.5	277.8	351.3	430.4	514.8	604.3	698.6	797.4	900.7	1008.2	1119.7	1235.2	1354.5	1477.6
22	160.9	226.0	298.2	377.0	461.9	552.6	648.6	749.8	855.9	966.7	1082.1	1201.8	1325.8	1453.9	1585.9
23	172.2	241.8	319.1	403.4	494.2	591.2	694.0	802.2	915.8	1034.3	1157.8	1285.9	1418.5	1555.6	1696.9
24	183.7	258.0	340.4	430.4	527.3	630.8	740.4	855.9	977.0	1103.5	1235.2	1371.9	1513.4	1659.6	1810.3
25	195.5	274.5	362.2	457.9	561.1	671.2	787.8	910.7	1039.6	1174.2	1314.3	1459.8	1610.3	1765.9	1926.3

ANEXO 8. Tabla de fijación de CO₂ (kg/árbol) en *Tectona grandis* (establecimiento 2016).

Altura(m)																								
Diám etro (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2	0.5	1.5	2.8	4.3	6.0	7.8	9. 8	12 .0	14 .3	16 .7	19 .2	21 .9	24 .7	27 .5	30 .5	33 .6	36 .8	40 .0	43 .4	46 .8	50 .4	54 .0	57 .7	61 .4
3	1.0	2.8	5.1	7.8	10. 9	14. 3	18 .0	21 .9	26 .1	30 .5	35 .2	40 .0	45 .1	50 .4	55 .8	61 .4	67 .2	73 .2	79 .3	85 .6	92 .1	98 .7	10 5. 4	11 2. 3

4	1.5	4.3	7.8	12. 0	16. 7	21. 9	27. .5	33. .6	40. .0	46. .8	54. .0	61. .4	69. .2	77. .3	85. .6	94. .2	10 3. 1	11 2. 3	12 1. 7	13 1. 4	14 1. 2	15 1. 4	16 1. 7	17 2. 3
5	2.1	6.0	10. 9	16. 7	23. 3	30. 5	38. .4	46. .8	55. .8	65. .3	75. .2	85. .6	96. .4	10 7. 7	11 9. 3	13 1. 4	14 3. 7	15 6. 5	16 9. 6	18 3. 1	19 6. 9	21 1. 0	22 5. 4	24 0. 1
6	2.8	7.8	14. 3	21. 9	30. 5	40. 0	50. .4	61. .4	73. .2	85. .6	98. .7	11 2. 3	12 6. 5	14 1. 2	15 6. 5	17 2. 3	18 8. 5	20 5. 3	22 2. 5	24 0. 1	25 8. 2	27 6. 7	29 5. 6	31 4. 9
7	3.5	9.8	18. 0	27. 5	38. 4	50. 4	63. .3	77. .3	92. .1	10 7. 7	12 4. 1	14 1. 2	15 9. 1	17 7. 6	19 6. 9	21 6. 7	23 7. 1	25 8. 2	27 9. 8	30 2. 0	32 4. 7	34 8. 0	37 1. 8	39 6. 1
8	4.3	12. 0	21. 9	33. 6	46. 8	61. 4	77. .3	94. .2	11 2. 3	13 1. 4	15 1. 4	17 2. 3	19 4. 1	21 6. 7	24 0. 1	26 4. 3	28 9. 3	31 4. 9	34 1. 3	36 8. 4	39 6. 1	42 4. 5	45 3. 5	48 3. 2
9	5.1	14. 3	26. 1	40. 0	55. 8	73. 2	92. .1	11 2. 3	13 3. 8	15 6. 5	18 0. 4	20 5. 3	23 1. 2	25 8. 2	28 6. 1	31 4. 9	34 4. 7	37 5. 3	40 6. 7	43 8. 9	47 2. 0	50 5. 8	54 0. 4	57 5. 7
10	6.0	16. 7	30. 5	46. 8	65. 3	85. 6	10 7. 7	13 1. 4	15 6. 5	18 3. 1	21 1. 0	24 0. 1	27 0. 5	30 2. 0	33 4. 7	36 8. 4	40 3. 2	43 8. 9	47 5. 7	51 3. 4	55 2. 1	59 1. 7	63 2. 1	67 3. 4
11	6.9	19. 2	35. 2	54. 0	75. 2	98. 7	12 4. 1	15 1. 4	18 0. 4	21 1. 0	24 3. 1	27 6. 7	31 1. 7	34 8. 0	38 5. 6	42 4. 5	46 4. 6	50 5. 8	54 8. 2	59 1. 7	63 6. 2	68 1. 8	72 8. 4	77 6. 0
12	7.8	21. 9	40. 0	61. 4	85. 6	112 .3	14 1. 2	17 2. 3	20 5. 3	24 0. 1	27 6. 7	31 4. 9	35 4. 8	39 6. 1	43 8. 9	48 3. 2	52 8. 8	57 5. 7	62 4. 0	67 3. 4	72 4. 1	77 6. 0	82 9. 1	88 3. 3

13	8.8	24. 7	45. 1	69. 2	96. 4	126 .5	15 9. 1	19 4. 1	23 1. 2	27 0. 5	31 1. 7	35 4. 8	39 9. 6	44 6. 2	49 4. 5	54 4. 3	59 5. 7	64 8. 5	70 2. 9	75 8. 6	81 5. 7	87 4. 2	93 3. 9	99 5. 0
14	9.8	27. 5	50. 4	77. 3	10 7.7	141 .2	17 7. 6	21 6. 7	25 8. 2	30 2. 0	34 8. 0	39 6. 1	44 6. 2	49 8. 2	55 2. 1	60 7. 7	66 5. 1	72 4. 1	78 4. 8	84 7. 0	91 0. 8	97 6. 1	10 42 .8	11 11 .0
15	10. 9	30. 5	55. 8	85. 6	11 9.3	156 .5	19 6. 9	24 0. 1	28 6. 1	33 4. 7	38 5. 6	43 8. 9	49 4. 5	55 2. 1	61 1. 8	67 3. 4	73 7. 0	80 2. 4	86 9. 6	93 8. 6	10 09 .3	10 81 .6	11 55 .5	12 31 .1
16	12. 0	33. 6	61. 4	94. 2	13 1.4	172 .3	21 6. 7	26 4. 3	31 4. 9	36 8. 4	42 4. 5	48 3. 2	54 4. 3	60 7. 7	67 3. 4	74 1. 3	81 1. 3	88 3. 3	95 7. 3	10 33 .2	11 11 .0	11 90 .6	12 72 .0	13 55 .1
17	13. 1	36. 8	67. 2	10 3.1	14 3.7	188 .5	23 7. 1	28 9. 3	34 4. 7	40 3. 2	46 4. 6	52 8. 8	59 5. 7	66 5. 1	73 7. 0	81 1. 3	88 7. 8	96 6. 7	10 47 .6	11 30 .7	12 15 .8	13 03 .0	13 92 .1	14 83 .0
18	14. 3	40. 0	73. 2	11 2.3	15 6.5	205 .3	25 8. 2	31 4. 9	37 5. 3	43 8. 9	50 5. 8	57 5. 7	64 8. 5	72 4. 1	80 2. 4	88 3. 3	96 6. 7	10 52 .5	11 40 .6	12 31 .1	13 23 .8	14 18 .6	15 15 .6	16 14 .7
19	15. 5	43. 4	79. 3	12 1.7	16 9.6	222 .5	27 9. 8	34 1. 3	40 6. 7	47 5. 7	54 8. 2	62 4. 0	70 2. 9	78 4. 8	86 9. 6	95 7. 3	10 47 .6	11 40 .6	12 36 .2	13 34 .2	14 34 .6	15 37 .4	16 42 .6	17 49 .9
20	16. 7	46. 8	85. 6	13 1.4	18 3.1	240 .1	30 2. 0	36 8. 4	43 8. 9	51 3. 4	59 1. 7	67 3. 4	75 8. 6	84 7. 0	93 8. 6	10 33 .2	11 30 .7	12 31 .1	13 34 .2	14 40 .0	15 48 .4	16 59 .4	17 72 .8	18 88 .7
21	18. 0	50. 4	92. 1	14 1.2	19 6.9	258 .2	32 4. 7	39 6. 1	47 2. 0	55 2. 1	63 6. 2	72 4. 1	81 5. 7	91 0. 8	10 09 .3	11 11 .0	12 15 .8	13 23 .8	14 34 .6	15 48 .4	16 65 .0	17 84 .3	19 06 .3	20 30 .9

22	19. 2	54. 0	98. 7	15 1.4	21 1.0	276 .7	34 8. 0	42 4. 5	50 5. 8	59 1. 7	68 1. 8	77 6. 0	87 4. 2	97 6. 1	10 81 .6	11 90 .6	13 03 .0	14 18 .6	15 37 .4	16 59 .4	17 84 .3	19 12 .2	20 42 .9	21 76 .5
23	20. 6	57. 7	10 5.4	16 1.7	22 5.4	295 .6	37 1. 8	45 3. 5	54 0. 4	63 2. 1	72 8. 4	82 9. 1	93 3. 9	10 42 .8	11 55 .5	12 72 .0	13 92 .1	15 15 .6	16 42 .6	17 72 .8	19 06 .3	20 42 .9	21 82 .6	23 25 .3
24	21. 9	61. 4	11 2.3	17 2.3	24 0.1	314 .9	39 6. 1	48 3. 2	57 5. 7	67 3. 4	77 6. 0	88 3. 3	99 5. 0	11 11 .0	12 31 .1	13 55 .1	14 83 .0	16 14 .7	17 49 .9	18 88 .7	20 30 .9	21 76 .5	23 25 .3	24 77 .3